SCIENCE et VIE
ÉDITION TRIMESTRIELLE N° 59 3 NF

NUMÉRO HORS SÉRIE

l'astronomie

Vous qui aimez la science, adhérez à la

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE

fondée en 1887 par Camille Flammarion, reconnue d'utilité publique en 1897

28, rue Serpente, Paris (6e)

Vous aurez à votre disposition une importante **Bibliothèque,** un **Observatoire,** des **séances mensuelles, cours, conférences,** etc. Vous recevrez la revue mensuelle, **L'ASTRONOMIE.**

Envoyez 1,50 NF en 6 timbres à 0,25, vous recevrez un numéro spécimen et les conditions d'adhésion ainsi qu'une plaquette : **Splendeur de l'Astronomie** abondamment illustrée des plus belles photographies célestes.

Permanence au Siège social, tous les jours non fériés de 14 à 17 heures.

POUR CONSTRUIRE VOUS-MEME VOTRE INSTRUMENT, ACHETEZ L'IMPORTANT OUVRAGE :

LA CONSTRUCTION DU TÉLESCOPE D'AMATEUR, par Jean TEXEREAU

Ingénieur du Laboratoire d'Optique de l'Observatoire de Paris, 2e édition considérablement augmentée, 296 pages 16 × 24, illustrées de 156 figures et 4 planches hors texte, sous reliure toile et jaquette illustrée. **25,50** NF franco, réduit à **19,50** NF pour les membres de la Société, payables à la commande : C.C.P. PARIS 1733

Université de Paris

LE PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

vous offre au PLANÉTARIUM

un spectacle émouvant et profitable :

Des programmes variés passent en revue les grands thèmes de l'Astronomie : Système planétaire, Voie Lactée, systèmes stellaires, Calendrier

Il permet une initiation rapide et sûre

en replaçant l'Homme dans les conditions idéales dont ont bénéficié les fondateurs de l'Astronomie : pasteurs chaldéens, prêtres d'Égypte ou philosophes grecs qui méditaient sous les climats privilégiés du pourtour de la Méditerranée.

Séances tous les jours (sauf le VENDREDI) **à 15 heures et 16 h 30**
et le MERCREDI à 21 heures

Avenue Franklin-D.-Roosevelt, PARIS (8e) Tél. : BALzac 17-24

pour connaître le monde sidéral

ASTRONOMIE
Camille Flammarion

avec la collaboration de

GABRIELLE CAMILLE FLAMMARION
Secrétaire Générale de la Société Astronomique de France

et ANDRÉ DANJON de l'Institut, Directeur de l'Observatoire de Paris

avec son nouveau chapitre :

SATELLITES ARTIFICIELS ET ENGINS EXTRA-TERRESTRES

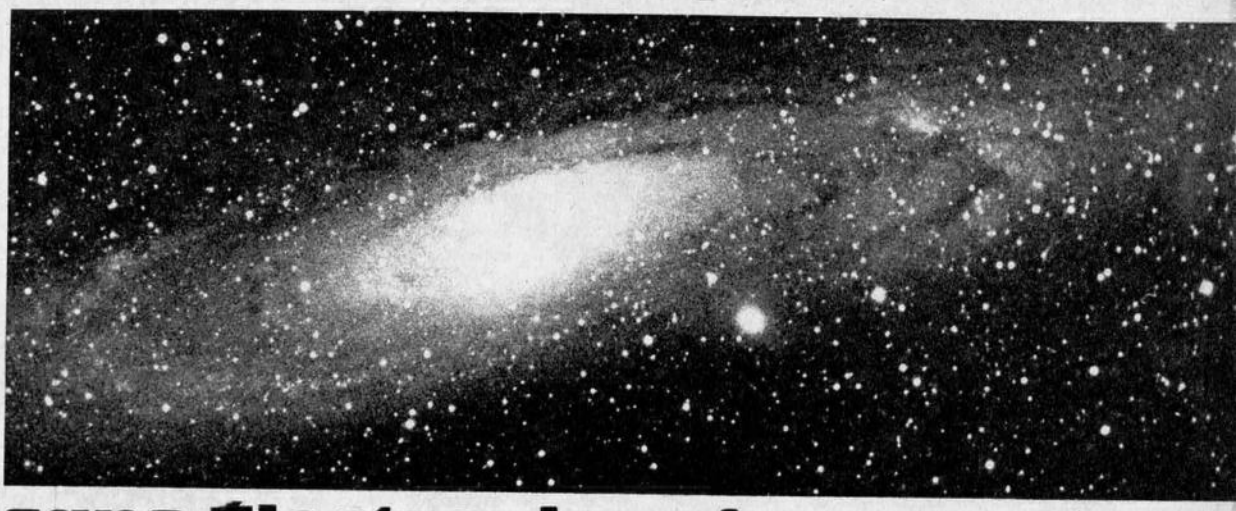
par PAUL MULLER Astronome titulaire de l'Observatoire de Paris

un succès universel 165ème mille

PL

Collection in-4° **FLAMMARION**

Pas d'Astronautique



sans Électronique !

Puisqu'en notre siècle de civilisation technique, celui qui veut "arriver" doit se spécialiser, votre avenir dépend du choix de cette spécialisation.

Or, de tous les domaines de l'industrie, celui qui peut le mieux satisfaire vos ambitions légitimes, est celui de l'Electronique. Science-clé du monde moderne, sans laquelle n'existeraient ni radio, ni télévision, ni satellites artificiels... son essor est tel qu'elle envahit tous les domaines de l'industrie.

Des carrières de premier plan attendent ceux qui auront étudié la radio-électricité, base de l'électronique.

Pour vous permettre d'y accéder, quelles que soient vos connaissances et votre situation actuelles, EURELEC a mis au point une forme nouvelle et passionnante de cours par correspondance qui remporte un succès considérable : créé en 1959, EURELEC compte déjà plus de 40.000 adhérents !

Associant étroitement leçons théoriques et montages pratiques, EURELEC vous donnera un enseignement complet : vous recevrez plus de 600 pièces détachées, soigneusement contrôlées, avec lesquelles vous construirez facilement trois appareils de mesure et un récepteur de radio à modulation de fréquence, d'excellente qualité !

Si vous avez déjà des connaissances en radio, EURELEC vous propose son Cours de télévision pour vous perfectionner encore davantage. 14 importantes séries de matériel, contenant plus de 1 000 pièces détachées, vous permettront de construire un Oscilloscope professionnel et un Téléviseur ultra-moderne, tout en acquérant une parfaite maîtrise des Techniques TV.

Grâce à notre enseignement **personnalisé**, vous apprendrez avec facilité, au rythme qui vous convient le mieux. Enfin, notre formule révolutionnaire d'inscription **sans engagement** (avec paiements fractionnés que vous êtes libre d'échelonner ou de suspendre à votre convenance) est pour vous une véritable **"assurance-satisfaction"**.

EURELEC vous ouvre les portes d'un avenir fascinant !

Alors n'hésitez pas, remplissez vite le bulletin ci-contre, découpez-le et envoyez-le à :

EURELEC

INSTITUT EUROPÉEN D'ÉLECTRONIQUE

Toute correspondance à :
EURELEC - DIJON (Côte d'Or)
(cette adresse suffit)

Hall d'Information : 31, rue d'Astorg - PARIS 8e
Pour le Bénélux exclusivement : Eurelec-Bénélux
11, rue des Deux Eglises - BRUXELLES 4

S.P.I.45

BON
(à découper ou à recopier)

Veuillez m'adresser gratuitement votre brochure illustrée SC 363

NOM .....

ADRESSE.....

.....

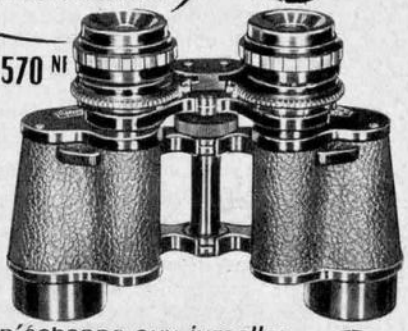
PROFESSION .....

(ci-joint 2 timbres pour frais d'envoi)

JOUEZ
avec les distances
multipliez à l'infini
le champ de votre plaisir

VARINOR
7 – 11 x 30
AU MONDE, LA PREMIÈRE JUMELLE DE FORMAT RÉDUIT, A **GROSSISSEMENT VARIABLE ET CONTINU**

TOUS LES AVANTAGES DE L'OBJECTIF **ZOOM** (FOCALE VARIABLE) APPLIQUÉS A LA **VISION BINOCULAIRE**



570 NI

FOURNISSEUR DE LA MARINE NATIONALE

RIEN *n'échappe aux jumelles*

HUET
de luxe

Image 100% plus claire et contrastée, grâce au TRAITEMENT SPÉCIAL des prismes et lentilles

MIRANOR 8x30 **345 NF**

ASTRONOR 10x40 **399 NF**

MIRAPAN 200
La seule jumelle au monde donnant à **1000 m** un champ de **200 m** grâce à ses optiques **paraboliques**
870 NF

ET TOUS MODÈLES : GRANDS OBJECTIFS ET LONGUE-VUES MONOCULAIRES A FORT GROSSISSEMENT

HUET PARIS

DOCUMENTATION SUR DEMANDE
CHEZ TOUS LES SPÉCIALISTES

PUBLI-CITÉ PHOT

V. de CALLATAŸ

ATLAS DE LA LUNE

ASTRONOMIE
ASTRONAUTIQUE

Préface de A. DOLLFUS

65 figures — plus de 100 photographies en héliogravure — 23 cartes — 22 cartes photographiques en pleine page — format 23,5 × 31 — reliure pleine toile sous jaquette illustrée plastique — 160 pages ..... **60** NF

✶

du même auteur :

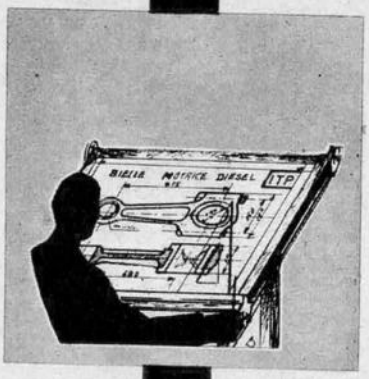
ATLAS DU CIEL

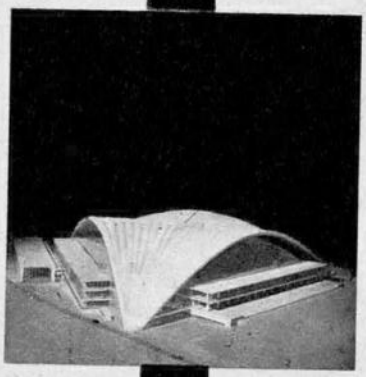
36 planches — 45 cartes — 26 théories 12 photos — 160 pages — Relié pleine toile ..... **45** NF

A. DE VISSCHER
GAUTHIER-VILLARS
Éditeurs

jeunes gens TECHNICIENS

PUBLI RB EITE





« l'École des cadres de l'Industrie, Institut Technique Professionnel, est l'une des plus sérieuses des Écoles par Correspondance. C'est pourquoi je lui ai apporté mon entière collaboration, sûr de servir ainsi tous les Jeunes et les Techniciens qui veulent « faire leur chemin » par le Savoir et le Vouloir. »

Maurice DENIS-PAPIN ✲ O. I.
Ingénieur-expert I.E.G. Officier de l'Instruction Publique.
Directeur des Études de l'Institut Technique Professionnel:

Vous qui voulez gravir plus vite les échelons et accéder aux emplois supérieurs de maîtrise et de direction, demandez, sans engagement, l'un des programmes ci-dessous en précisant le numéro. Joindre deux timbres pour frais.

N° 00 **TECHNICIEN FRIGORISTE ET INGÉNIEUR**
Étude théorique et pratique de tous les appareils ménagers et industriels (systèmes à compresseur et à absorption), électriques, à gaz et dérivés.

N° 01 **DESSIN INDUSTRIEL**
Préparation à tous les C.A.P. et au Brevet Professionnel des Industries Mécaniques. Cours de tous degrés de Dessinateur-Calqueur à Sous-Ingénieur, Chef d'Études. Préparation au Baccalauréat Technique.

N° 03 **ÉLECTRICITÉ**
Préparation au C.A.P. de Monteur-Électricien. Formation de Chef Monteur-Électricien et de Sous-Ingénieur Électricien.

N° 0ELN **ÉLECTRONIQUE**
Cours de Sous-Ingénieur et d'Ingénieur spécialisé.

N° 0EA **ÉNERGIE ATOMIQUE**
Cours de Technicien et d'Ingénieur en Énergie atomique.

N° 04 **AUTOMOBILE**
Cours de Chef Électro-Mécanicien et de Sous-Ingénieur. Préparation à toutes les carrières de l'Automobile (S.N.C.F.-P.T.T.-Armée).

N° 05 **DIESEL**
Cours de Technicien et de Sous-Ingénieur spécialisé en moteurs Diesel. Étude des particularités techniques et de fonctionnement des moteurs Diesel de tous types (Stationnaires-Traction-Marine-Utilisation aux Colonies).

N° 06 **CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES**
Étude de la Statique Graphique et de la Résistance des Matériaux appliquée aux constructions métalliques. Calculs et tracés des fermes, charpentes, ponts, pylônes, etc. Préparation de Dessinateur spécialisé en Constructions Métalliques.

N° 07 **CHAUFFAGE ET VENTILATION**
Cours de Technicien spécialisé et Dessinateur d'Études. Cours s'adressant aussi aux Industriels et Artisans désirant mener eux-mêmes à bien les études des installations qui leur sont confiées.

N° 08 **BÉTON ARMÉ**
Préparation technique de Dessinateur et au C.A.P. de Constructeur en Ciment Armé. — Formation de Dessinateur d'Étude (Brevet Professionnel de dessinateur en Béton Armé. Formation d'Ingénieurs en B.A.).

N° 09 **INGÉNIEURS SPÉCIALISÉS** (Enseignement supérieur)
a) Mécanique Générale — b) Constructions Métalliques — c) Automobile — d) Moteurs Diesel — e) Chauffage Ventilation — f) Électricité — g) Froid — h) Béton Armé — i) Énergie Atomique — j) Électronique. **Préciser la spécialité choisie.**

NOS RÉFÉRENCES :
— *Électricité de France*
— *Ministère des Forces Armées*
— *Cie Thomson-Houston*
— *Cie Générale de T.S.F.*
— *Alsthom*
— *La Radiotechnique*
— *Lorraine-Escaut*
— *Burroughs*
— *B.N.C.I.*
— *S.N.C.F.*

INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL
Ecole des Cadres de l'Industrie
69, rue de Chabrol, Bâtim. A - PARIS X^e

pour la **Belgique :** I.T.P. Centre Administratif,
5, Bellevue, WEPION

Une véritable
encyclopédie permanente

les numéros hors-série de

SCIENCE ET VIE

- L'ELECTRONIQUE
- LA MUSIQUE
- L'AVIATION
- LES CHEMINS DE FER
- L'ENERGIE
- PHOTOGRAPHIE (ET CINEMA D'AMATEURS)
- AUTOMOBILE 1962
- L'HABITATION
- MEDECINE-CHIRURGIE
- LA VITESSE
- L'HOMME DANS L'ESPACE
- LA MER
- LE SAHARA

Envoi franco
sur demande

à **SCIENCE et VIE**

5, rue de la Baume PARIS VIII[e]

Joindre 3,30 NF par numéro commandé

C.C.P. PARIS 91-07

NUMÉRO HORS SÉRIE

l'astronomie

- L'IMAGE DE L'UNIVERS 6
- INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE L'ASTRONOMIE 24
- HORLOGE - TERRE ET HORLOGE ATOMIQUE 48
- LA LUNE ET LES PLANÈTES 52
- LE SOLEIL 74
- LES ÉTOILES 90
- NOTRE GALAXIE 110
- LES GALAXIES ET L'EXPANSION DE L'UNIVERS 132
- ASTRONOMIE ET RECHERCHE SPATIALE 146
- LA VIE DANS L'UNIVERS 156

Notre couverture représente le nouveau radiotélescope de Parkes, en Australie, dont le miroir parabolique mesure 67 m de diamètre (photo communiquée par le Bureau d'Inform. australien à Paris).

Directeur général :
Jacques Dupuy

Directeur :
Jean de Montulé

Rédacteur en chef :
Jean Bodet

Direction, Administration, Rédaction : 5, rue de La Baume, Paris-8e. Tél. : Balzac 57-61. Chèque postal 91-07 PARIS. Adresse télégr. : SIENVIE PARIS.

Publicité : 2, rue de La Baume, Paris-8e. Tél. : Elysées 87-46.

New York : Arsène Okun, 64-33, 99th Street Forest Hills, 74 N. Y. Tél. : Twining 7.3381.

Londres : Louis Bloncourt, 17 Clifford Street, London W. 1. Tél. : Regent 52-52

Washington : Science Service, 1 719 N Street N.W. Washington 6, D.C. (U.S.A.)

TARIF DES ABONNEMENTS

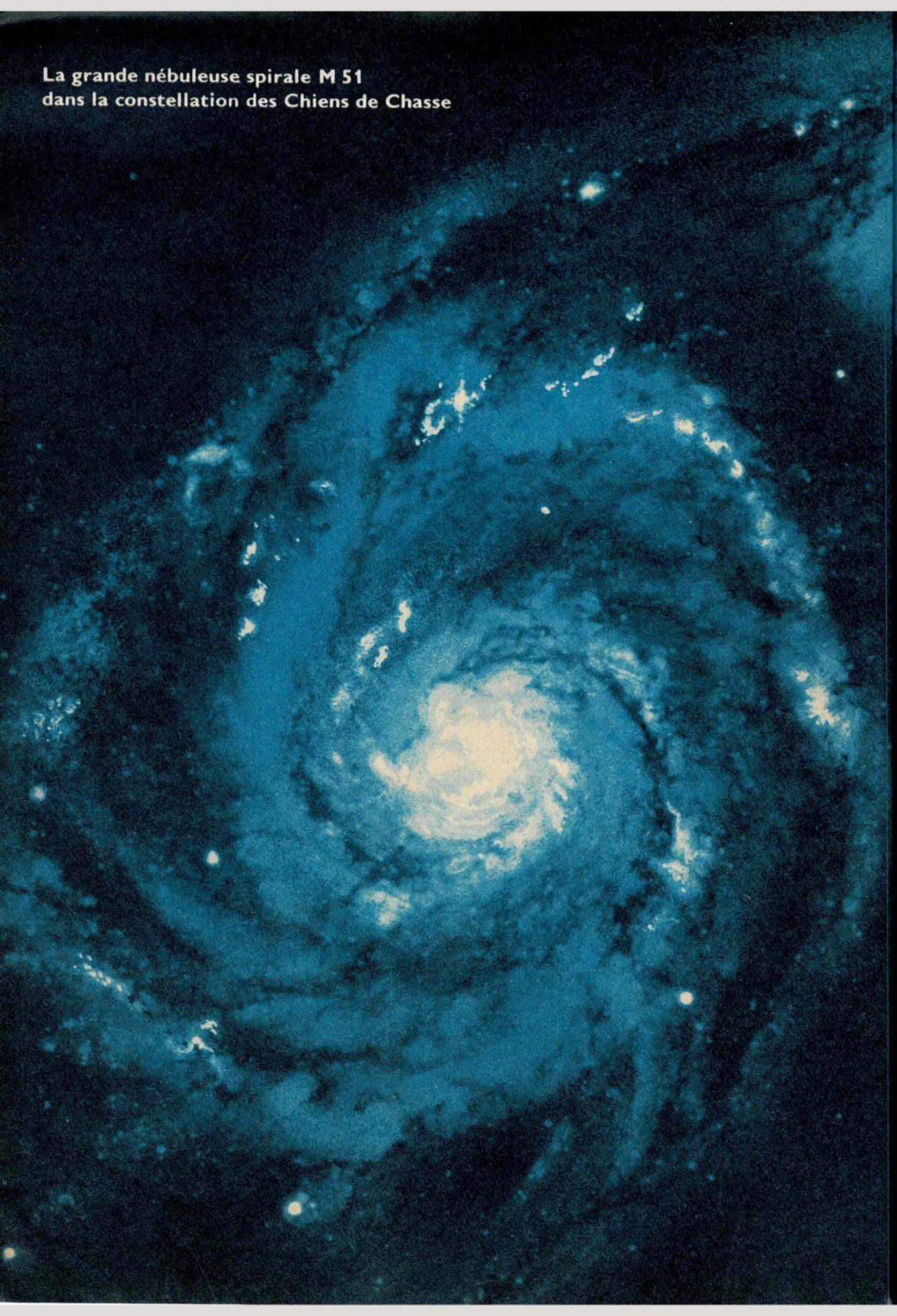
POUR UN AN :	France et Union Fse	Étranger
12 parutions	20,— NF	24,— NF
12 parutions (envoi recommandé)	28,50 NF	33,— NF
12 parutions plus 4 numéros hors série	30,— NF	37,— NF
12 parutions plus 4 numéros hors série (envoi recdé)	42,— NF	49,— NF

Règlement des abonnements: SCIENCE ET VIE, 5, rue de La Baume-Paris. C.C.P. PARIS 91-07 ou chèque bancaire. Pour l'Étranger par mandat international ou chèque payable à Paris. Changement d'adresse : poster la dernière bande et 0,30 NF en timbres-poste.

Belgique et Grand-Duché (1 an) Service ordinaire ..... **FB 180**
Service combiné ..... **FB 330**

Hollande (1 an) Service ordinaire ..... **FB 200**
Service combiné ..... **FB 375**

Règlement à Édimonde, 10, boulevard Sauvenière, CCP. 283.76, P.I.M. service Liège.



La grande nébuleuse spirale M 51
dans la constellation des Chiens de Chasse

L'IMAGE DE L'UNIVERS

L'ASTRONOMIE fut la première science de la nature à se constituer: elle n'a pas moins de deux millénaires d'avance sur une véritable physique. C'est pourquoi son rôle dans l'évolution de la raison apparaît comme primordial. Elle seule était assez développée pour servir de pierre de touche aux démarches de l'esprit. Voici l'admirable phrase où notre maître Jean Perrin proclamait cette conviction:

« C'est une bien faible lumière qui nous vient du ciel étoilé. Que serait, pourtant, la pensée humaine, si nous ne pouvions pas percevoir ces étoiles, comme il fût arrivé, par exemple, si, pareille à sa sœur Vénus, la Terre s'enveloppait toujours d'un manteau de nuages ? »

Je me propose d'illustrer cela par quelques exemples, glanés aux moments décisifs d'une longue histoire. Sous la pression des progrès de l'Astronomie, on verra se modifier les *évidences* (qui servent de point de départ à toute pensée), les *objectifs* de la raison (c'est-à-dire le caractère des explications qui satisfont), enfin les *rouages* mêmes de la pensée, par assouplissement des liens logiques.

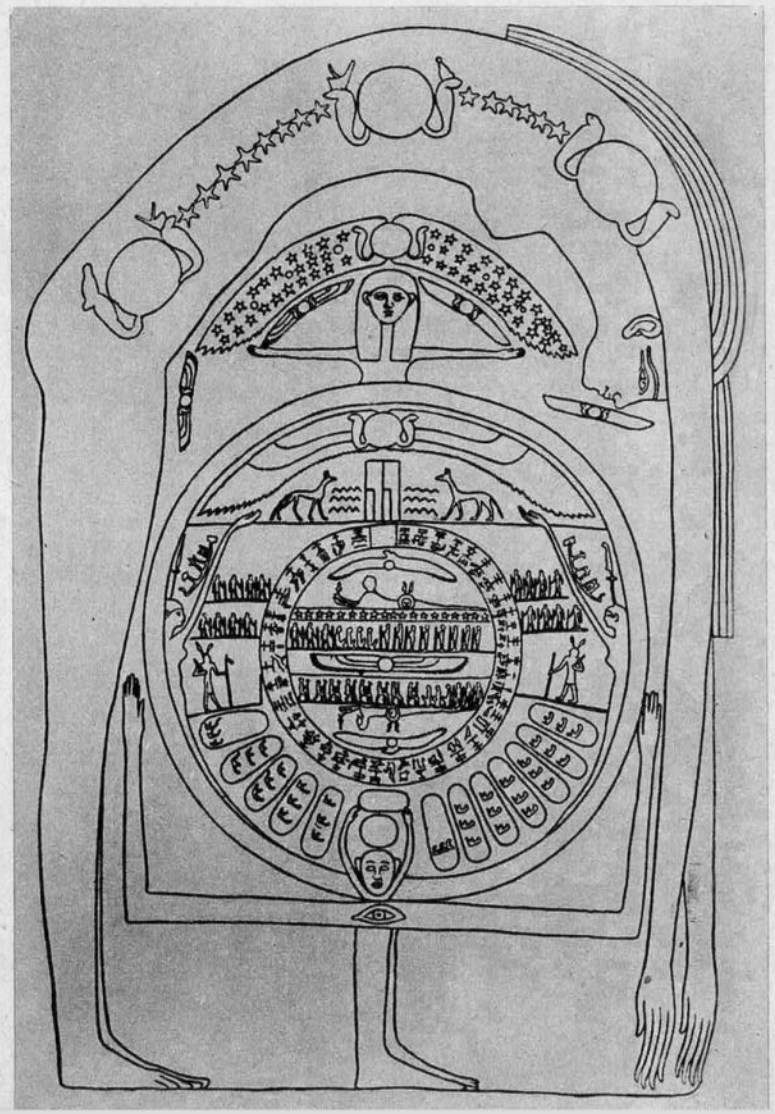
Dès la préhistoire, les astres se sont associés étroitement à la vie sentimentale des humains. Des phénomènes célestes impossibles à ignorer règlent l'activité du primitif et lui fournissent des unités naturelles de temps: ce sont d'abord l'alternance régulière du jour et de la nuit, le lever et le coucher du Soleil. Puis, les phases de la Lune lui permettent de grouper aisément les jours par trentaines : les premiers calendriers sont...

... lunaires. Rythme de vie, horloge et calendrier dépendent du ciel. D'autre part, le ciel est la source de phénomènes effrayants dont les hommes éprouvent la puissance : les orages et la foudre, les inondations et les cyclones, les chutes d'aérolithes. L'homme interprète comme des avertissements pour lui les signes qui s'inscrivent parfois sur la voûte céleste : arc-en-ciel, étoiles filantes, éclipses, comètes.

Cette puissance céleste engendre des cultes multiples : des êtres divins peuplent le ciel; si l'on conçoit un être suprême, il habite le ciel. Le ciel est même source du pouvoir terrestre : les empereurs chinois se diront « Fils du Ciel ». Mais, dans ce mélange d'astronomie et de météorologie, l'arbitraire domine l'ordre : c'est pourquoi les sociétés primitives installent au ciel la fantaisie de leurs mythes, de leurs héros et de leurs dieux. C'est l'âge des conceptions « affectives » de l'Univers.

Le stade agricole

La pratique de l'agriculture a constitué l'une des principales étapes de la civilisation. Le stade agricole fut imprégné d'astronomie : dans l'agriculture, le ciel renouvelle les preuves de sa puissance et accentue son emprise sur les sociétés. L'homme reconnaît alors qu'un déplacement assez lent du Soleil parmi cer-



Cosmologie symbolique égyptiennne. Au milieu, la Terre sous la protection du Soleil auquel les habitants de l'Égypte rendent hommage. Surplombant la Terre, la voûte céleste étoilée sous l'aspect d'une déesse aux formes allongées.

Le Dieu aztèque du Soleil, Tonatinh, avec les attributs de la puissance suprême.

taines constellations accompagne fidèlement le cycle de la végétation terrestre. Pour connaître le retour des saisons, fixer la date des semailles, prévoir l'époque des pluies saisonnières, l'agriculture va déduire un calendrier de l'observation régulière du ciel : le circuit du Soleil s'opérant en 12 lunaisons environ, on fonde 12 constellations telles que le Soleil traverse chacune d'elles en un mois ; le programme agricole est minutieusement réglé sur ces constellations d'après l'heure du lever ou du coucher de leurs étoiles.

Par là, l'homme dégage peu à peu l'Astronomie, qui est ordre, de la Météorologie, source d'arbitraire. C'est un fait que les civilisations sont nées sous des cieux clairs ; sans le ciel, sans sa leçon de mathématiques, la règle et le nombre se seraient-ils jamais associés à la pensée ? Par sa connexion avec l'agriculture, le ciel montre que le monde est soumis à des relations nécessaires : la notion de déterminisme est descendue du ciel sur la Terre.

L'Age d'or des Grecs

Au sein du peuple grec, à partir du VI^e^ siècle avant notre ère, s'instaure, dans les sciences de la nature, un rationalisme avant lequel le nom de *science* ne mérite guère d'être prononcé. Le surnaturel, la magie sont écartés des phénomènes naturels. Les besoins mystiques subsistent, très puissants, mais dans un domaine à part, laissant la science relativement autonome. Les sages de la Grèce examinent l'Univers avec l'idée qu'il est intelligible et soumis à des règles simples qu'il convient de rechercher.

La pensée prend conscience de sa dignité et prétend se satisfaire, non plus par l'assentiment collectif, mais par des formes de jugement intime ne devant qu'à elles-mêmes la certitude.

La première conquête consiste à reconnaître la Terre comme un corps céleste. Il y a loin de la conception d'une Terre flottant sur les eaux ou érigée sur des piliers, à celle d'un bolide isolé dans l'espace et que rien ne soutient (Anaximandre, vers 575 av. J.-C.). En même temps, progrès connexe, la coupole hémisphérique des cieux, que perçoivent nos regards, se transforme en une sphère complète dont les astres font le tour en passant sous la Terre. L'homme a imaginé la sphère céleste entière plus de mille ans avant que ses voyages à la surface de la Terre lui aient permis de la voir en totalité.

Cent ans plus tard, vers 475 av. J.-C., dans l'ambiance pytha-

La constellation du Sagittaire dans la description arabe d'Abd-er-Rahman al Sufi (vers l'an 1300).

goricienne, naît l'idée que la Terre est aussi une sphère. Un siècle encore, et Aristote saura donner de cette sphéricité plusieurs preuves tirées de l'observation (variation du panorama des cieux quand on voyage en latitude, ombre en arc de la Terre sur la Lune lors des éclipses de Lune, etc.).

Il nous est difficile aujourd'hui d'évaluer l'immensité des progrès qui firent passer l'humanité, en peu d'années, du témoignage banal des sens — où le Monde semble un plateau plus ou moins raboteux, recouvert d'une cloche azurée — à la conception d'une Terre promise au rang d'astre sphérique, isolée au sein d'un espace également sphérique, Terre, enfin, dont tous les points en surface s'équivalent pour les habitants.

Le jour et la nuit

Ces notions sont simples pour nous. Pourtant les hommes s'y sont trompés jusqu'au v^e^ siècle avant notre ère.

On voyait, certes, le Soleil renforcer la clarté, mais le jour se lève avant le Soleil et persiste après son coucher. Et, pendant les périodes de temps couvert, où le Soleil ne paraît pas, il fait jour néanmoins.

Le Soleil n'était donc pas tenu pour la cause unique du jour. On prenait la clarté et l'obscurité pour deux substances; la lumière était une vapeur claire, les ténèbres étaient une vapeur sombre qui monte le soir de la Terre.

Ces idées fausses se sont dissipées en deux étapes. D'abord les Grecs ont reconnu que la Lune est un corps opaque qui brille d'un éclat emprunté au Soleil, car sa partie éclairée est toujours tournée vers le Soleil tandis que le reste du disque lunaire demeure invisible.

Puis (vers 450 av. J.-C.) s'établit la théorie correcte des éclipses de Lune; la Terre, éclairée par le Soleil, porte une ombre, et quand la Lune traverse cette ombre, elle perd son éclat. Ce mécanisme impose les distinctions essentielles : la nuit n'est qu'une ombre,

les ténèbres sont absence de lumière; la lumière seule est concrète et le Soleil seul nous la fournit.

L'explication des éclipses fut la première théorie scientifique faisant intervenir les rapports entre plusieurs astres.

Le système planétaire

Les divers systèmes planétaires de la science grecque sont des chefs-d'œuvre. Les Grecs se sont posé le très difficile problème de rendre compte de la marche des planètes — marche compliquée, comportant des allées et venues en zigzags — en combinant uniquement des mouvements circulaires et uniformes.

Par affirmation dogmatique, la perfection du cercle et l'uniformité du mouvement paraissaient seules dignes des corps célestes.

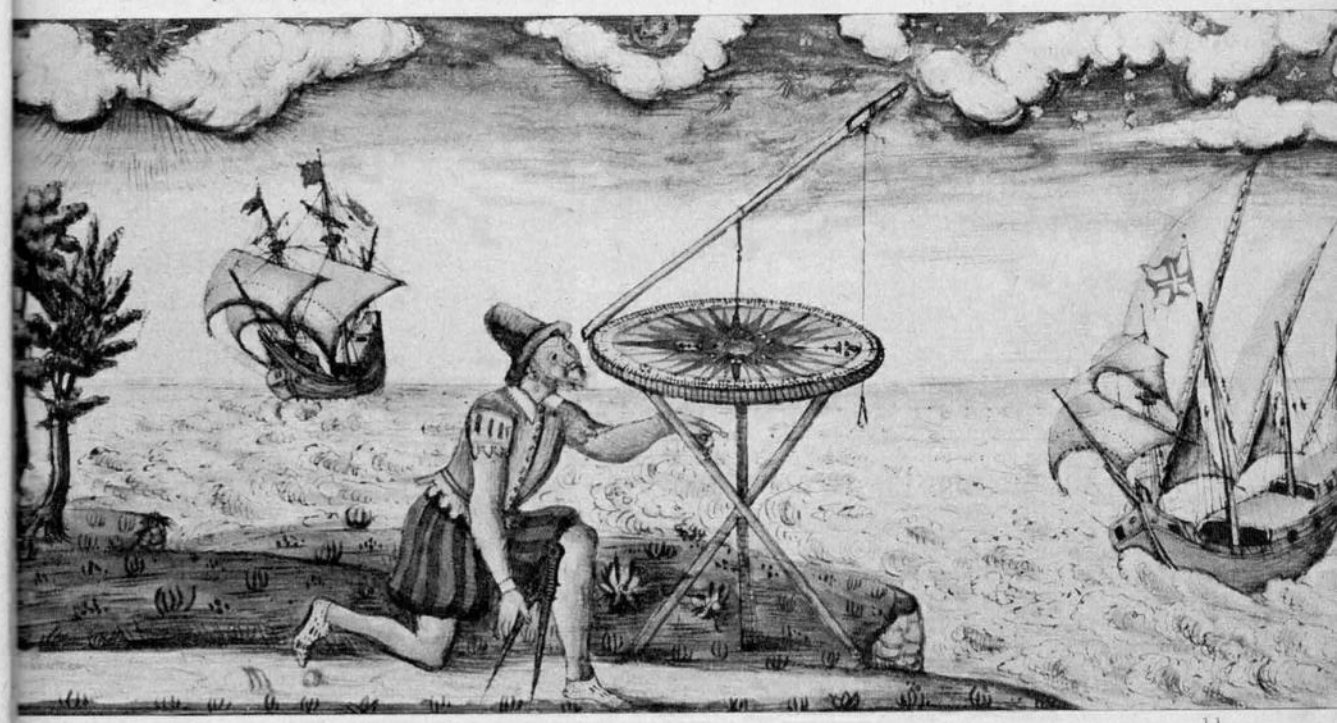
Le plus extraordinaire, c'est que la tentative ait assez bien réussi. D'Eudoxe à Ptolémée, cette géométrisation rudimentaire des cieux aboutit à une astronomie efficace, où la marche des astres est codifiée et prévue. L'Almageste de Ptolémée sera, pendant quatorze siècles, le flambeau de la science humaine.

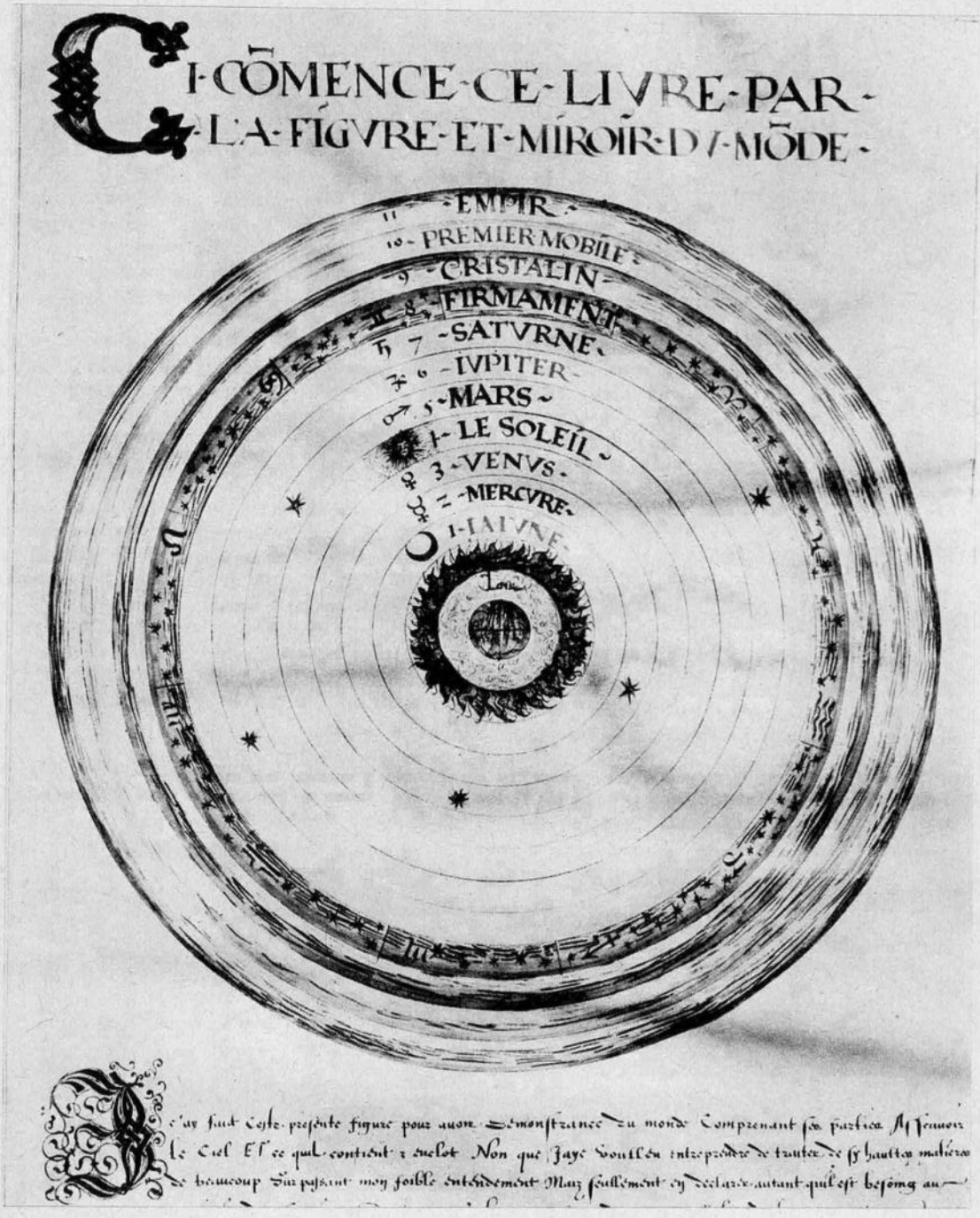
Il faut cependant noter ici le double échec des Grecs en Mécanique :

a) ils ont échoué en dynamique terrestre pour s'être fiés à l'évidence. Ici-bas, tout mouvement non entretenu s'arrête; les Grecs en ont conclu que le repos est plus naturel que le mouvement; ils n'ont pas découvert le principe essentiel de l'inertie (que Galilée et Descartes mettront à la base de la mécanique);

b) en mécanique céleste, ils ont abandonné leur idéal rationnel : les astres, d'essence divine, ne s'élèvent ni ne tombent, et se meuvent perpétuellement. Cette organisation n'implique pas la recherche d'une cause physique : on se satisfera de mots.

Comment on prenait la hauteur d'un astre au temps des grandes explorations. Sur une table horizontale portant la rose des vents, une tige creuse pivote autour d'un axe vertical. Un fil à plomb précise l'azimut et permet de calculer la pente de la visée.





L'ordre du monde, tel qu'on le concevait avant Copernic

La Terre, avec l'air et les océans, occupe une position centrale. Elle est entourée des orbes de la Lune et des planètes parmi lesquelles est rangé le Soleil. Après Saturne est figuré le firmament portant les étoiles, réparties entre les constellations du zodiaque représentées par leurs signes classiques, soit, en sens inverse des aiguilles d'une montre, les Gémeaux, le Cancer, le Lion, la Vierge, la Balance, le Scorpion, le Sagittaire, le Capricorne, le Verseau, les Poissons, le Bélier et le Taureau. Au delà du ciel visible ainsi limité par le firmament étoilé, le cosmologiste a imaginé trois sphères supplémentaires, nécessaires, selon lui, à l'explication complète du Monde.

Les fondateurs de l'astronomie moderne

Le livre de Copernic, « Des Révolutions des orbes célestes » propose, en 1543, un nouvel ordre du système planétaire : le Soleil prend la place centrale, occupée auparavant par la Terre. La Terre devient une planète parmi les autres, plus éloignée du Soleil que Mercure et Vénus, moins éloignée que Mars, Jupiter ou Saturne, une sphère de matière obscure circulant, comme plusieurs autres, perpétuellement, autour de l'éblouissant Soleil central.

Ce livre marque un tournant essentiel de la pensée; à peine pourrait-on citer deux ou trois ouvrages qui aient eu des répercussions comparables. Par lui, la vision médiévale du monde profane ou sacré est ruinée : les spéculations fondées sur l'auguste immobilité de la Terre, sur sa position centrale unique en l'Univers, le Soleil et les étoiles destinés à éclairer nos jours et nos nuits, de tout cela rien ne subsiste.

Avec Copernic, l'homme se détache définitivement de son horizon terrestre, il devient capable de comprendre sa situation subordonnée et d'y raccorder ses perceptions. Il cesse de se fier naïvement à ses regards; l'être biologique fait place au « moi spirituel » de la science; comme l'a dit de manière frappante Léon Brunschvicg : « Un Soleil de la pensée se substitue au Soleil de la perception. »

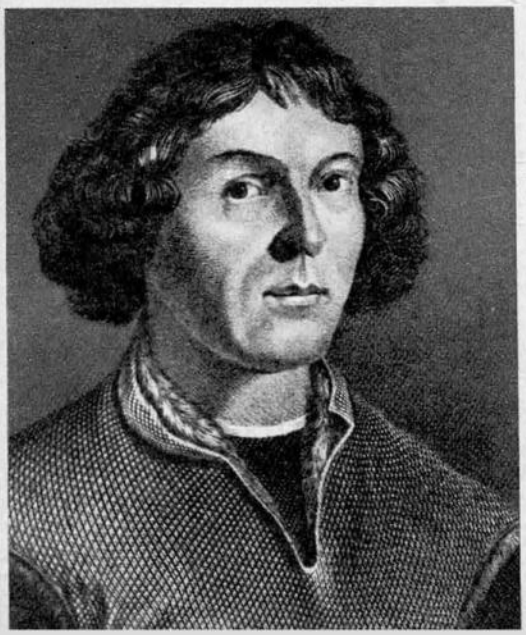
Képler est le législateur de ce système solaire. Muni des observations excellentes de Tycho Brahé, doué d'une imagination débordante, mais soumettant toutes ses hypothèses au contrôle des faits, par l'intermédiaire du calcul, Képler découvrit, en une vie de labeur, les trois lois qui portent son nom.

Les planètes décrivent non des cercles, mais des ellipses; leur mouvement n'est pas uniforme, mais varié.

Il est saisissant de voir Képler, d'une accumulation de retouches quantitatives, faire jaillir une transformation *qualitative :* avec lui s'effacent les préjugés du mouvement circulaire et uniforme, que les Pythagoriciens et Platon avaient imposés.

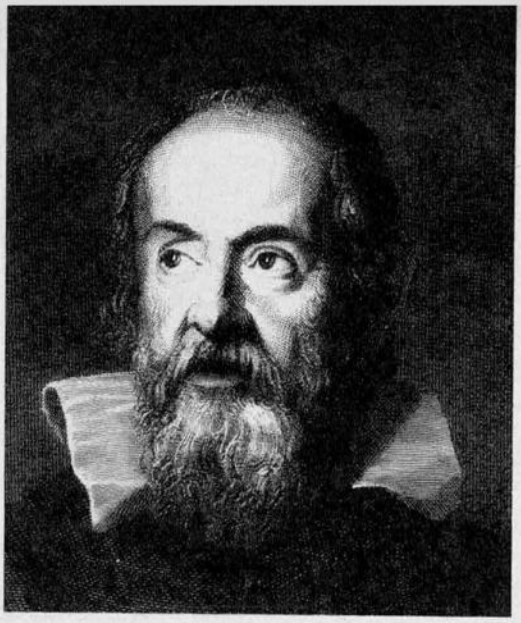
Pendant que Képler inaugurait empiriquement la mécanique céleste, Galilée fondait la mécanique terrestre. Ces deux mécaniques, si tardivement et simultanément apparues, paraissaient d'ailleurs radicalement différentes.

Il fut donné à Isaac Newton d'opérer leur synthèse. Le livre de Newton, paru en 1687 sous le titre « Principes mathématiques de la philosophie naturelle », a longtemps passé pour la plus haute production de l'esprit humain.



Copernic (1473-1543)

Né à Thorn, Copernic, après de brillantes études à Cracovie, passe neuf ans dans les universités italiennes. Il en revient ayant fait le tour des connaissances de l'époque, mais réputé surtout, déjà, comme astronome. Il passe les trente-sept dernières années de sa vie comme chanoine à Frauenbourg, sur la Baltique. Son ouvrage « Des révolutions des orbes célestes » (1543) marque un tournant décisif de la pensée humaine. Otant la Terre du centre du Monde, il y met le Soleil et lance la Terre autour de lui, comme les autres planètes. Il fut guidé par les opinions de quelques savants grecs, mais ce sont surtout des arguments tirés de l'observation qui entraînèrent sa conviction du mouvement de la Terre (grandes variations de l'éclat des planètes, époques de leur maximum, inégalités des rétrogradations). Son œuvre suscita de très violentes oppositions religieuses et philosophiques. Mais la pensée moderne était en marche.



Galilée (1564-1643)

Né en Toscane, Galilée est le véritable fondateur de la physique et de la méthode expérimentale. Ses expériences sur la chute des corps et sur le pendule, sur la thermométrie, sur les cordes vibrantes, etc., sont dans toutes les mémoires. Professeur de mathématiques à l'Université de Padoue, ses leçons de mécanique eurent un succès considérable dans l'Europe entière. Mais il eut aussi le privilège d'utiliser le premier la lunette pour l'étude du ciel. Il découvrit la nature de la Voie Lactée, les montagnes de la Lune dont il mesura la hauteur, les gros satellites de Jupiter, les phases de Vénus, la rotation du Soleil et ses taches, la complexité de Saturne avec son anneau. Partisan du système de Copernic, il fut fortifié dans cette opinion par ses propres découvertes. Mis en demeure par le tribunal de l'Inquisition d'abjurer ses convictions du mouvement de la Terre, il reste pour le public le type du martyr pour la vérité scientifique.

Des lois de Képler, Newton remonte à la cause des mouvements : l'*attraction universelle*. Sa loi permet de déduire, de l'état du système à un instant donné, l'état à l'instant qui suit : elle satisfait le déterminisme de façon parfaite. Elle identifie la pesanteur à la force qui gouverne les astres, la matière terrestre à la matière céleste. Elle explique les marées, l'aplatissement de la Terre, les perturbations planétaires.

Cette œuvre marque un nouveau tournant du développement de l'esprit humain : après Newton, la pensée prend de nouveaux caractères, se croit sûre de ses bases et s'avance fièrement à la conquête de toute la nature. Pour la première fois, l'homme, à partir de principes élémentaires, avait expliqué des traits essentiels du Monde sensible.

Jusqu'à l'aube du XX^e^ siècle, les sciences ont voulu calquer leur développement sur celui de la mécanique céleste : pendant deux cents ans, la physique et les techniques ont trouvé dans cette œuvre leurs bases, leur méthode, leurs instruments de calcul et leur idéal. La philosophie, enfin, a puisé chez Newton une conception du monde sensible qui n'a changé qu'en notre siècle.

Distance de la Terre au Soleil

La première évaluation convenable de la distance de la Terre au Soleil date de 1672.

Elle est due à deux Français, Picard et Richer, qui utilisèrent l'« opposition » de la planète Mars. Dans cette position, Mars se trouve à sa plus courte distance de la Terre. Richer, s'étant rendu à Cayenne, visa Mars en même temps que Picard la visait de Paris. Mars leur apparut en deux positions différentes sur la toile de fond lointaine des constellations. La distance Paris-Cayenne étant connue, l'écart angulaire entre ces positions de Mars permet de calculer la distance de Mars à la Terre.

La troisième loi de Képler (qui associe les distances relatives des planètes au Soleil à leurs durées de révolution bien connues) permet immédiatement de déduire la distance Terre-Soleil de la distance Terre-Mars en opposition. Picard et Richer trouvèrent une valeur correcte à 8 % près de la distance Terre-Soleil, qui est voisine de 150 millions de kilomètres. Auparavant, on croyait, depuis Ptolémée, cette distance vingt fois plus courte : le système solaire fut ainsi considérablement agrandi.

Le château d'Uranienbourg, ainsi baptisé en l'honneur d'Uranie, muse de l'Astronomie, s'élevait sur l'île de Hven, entre le Danemark et la Suède. Il fut terminé en 1586 et coûta au roi de Danemark, à ce que disait Tycho-Brahé lui-même, plus d'une tonne d'or. Les plus grands instruments d'observation, sextants, quadrants, armillaires, étaient logés sous les toits côniques à panneaux de cuivre coulissants. A l'étage inférieur se trouvaient un mystérieux laboratoire d'alchimie, un atelier d'imprimerie et la bibliothèque, avec le grand globe métallique de 2 m de diamètre que Tycho-Brahé avait fait fabriquer spécialement par les plus habiles artisans d'Augsbourg et sur lequel il avait fait reporter avec une minutieuse précision les positions de quelque mille étoiles.

Tycho-Brahé (1546-1601)

Né à Knudstrup au Danemark et issu d'une riche famille, Tycho-Brahé se prend de passion pour la recherche astronomique dès son adolescence. Ayant constaté les erreurs des tables astronomiques dont on disposait à l'époque, il décide de consacrer sa vie à fonder une astronomie de précision. Frédéric II de Danemark, généreux mécène, lui accorde la propriété de l'île de Hven et consacre une grande partie des revenus du royaume à y fonder en 1576 un immense observatoire où Tycho-Brahé travailla pendant vingt et un ans. Les instruments remarquablement perfectionnés construits par lui portèrent les mesures (sans le secours de l'optique) à un degré de précision qui a permis les découvertes de Képler. Les travaux personnels de Tycho-Brahé ne sont d'ailleurs pas négligeables : tables de réfraction, catalogue d'étoiles, théorie de la Lune. A la mort de son protecteur, il se retira à Prague où il mourut.

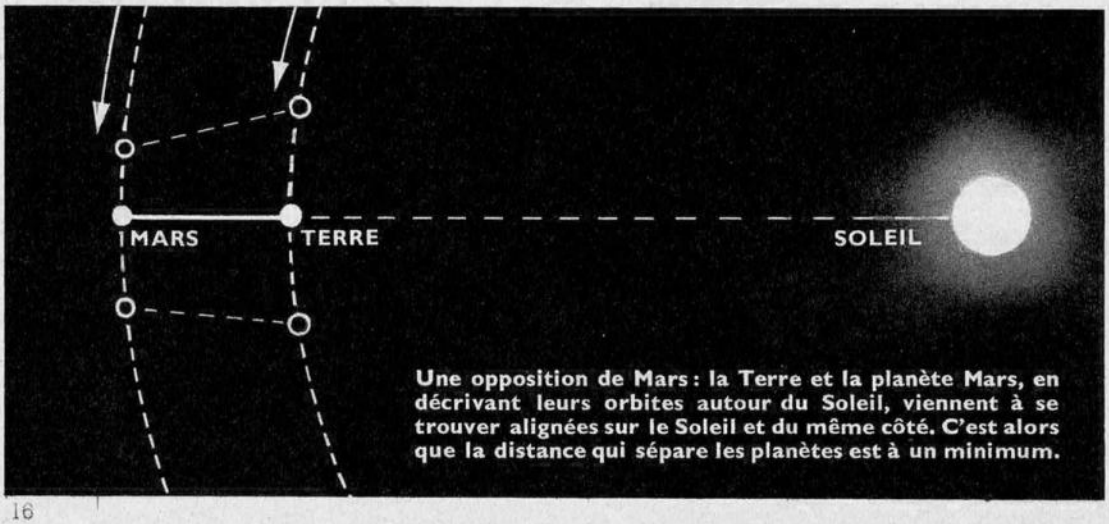
Képler (1571-1630)

Né près de Weil, dans le Wurtemberg, d'une famille paysanne, Képler a mérité le nom de législateur du Système solaire. Héritier des documents de Tycho-Brahé dont il avait été l'élève à Prague et auquel il succéda comme astronome de l'empereur Rodolphe II, il cherche à préciser les trajectoires des planètes. Les préjugés hérités des Anciens imposaient pour elles des trajectoires circulaires parcourues avec des mouvements uniformes. Mais les observations de Tycho-Brahé, à qui Képler faisait entière confiance, ne s'accordaient pas avec ces conceptions, et il sut en dégager, entre 1609 et 1618, les lois qui portent son nom et substituer des ellipses aux cercles. Doué d'une imagination prodigieuse et de tempérament mystique, Képler mit beaucoup de bizarrerie dans ses recherches sur les « Harmonies du Monde ». Mais, travailleur acharné, il soumettait tout au calcul et rejetait les spéculations avérées inexactes.

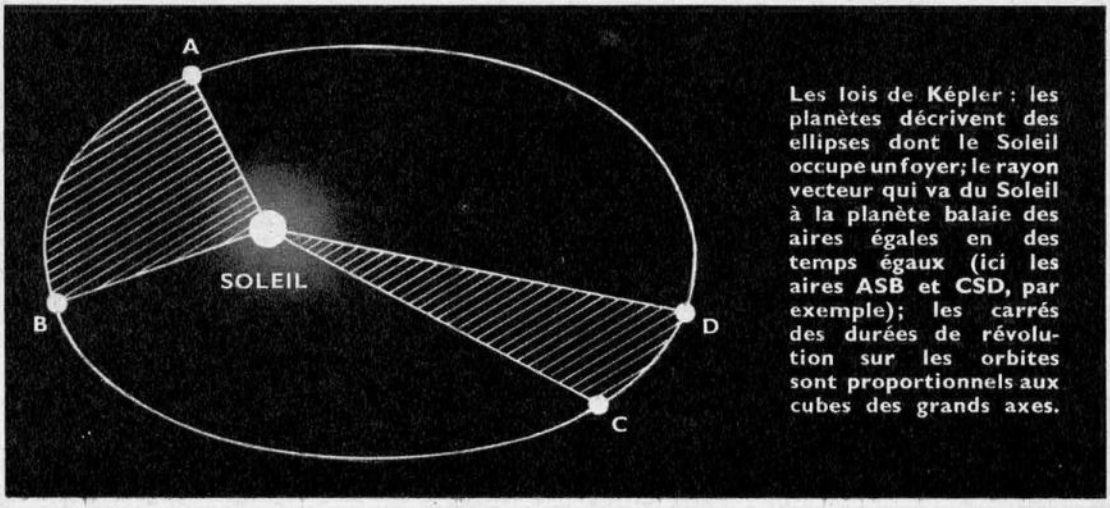
Le Soleil est une étoile

Des étoiles, les Anciens n'ont rien su sauf leur éclat apparent; ils les disaient « fixes » et les croyaient à une même distance de la Terre au firmament.

La conviction scientifique que le Soleil est une étoile est moderne : elle exigeait qu'on eût la preuve de l'extrême éloignement des étoiles. Cette preuve est contenue dans le système de Copernic, où l'immense orbite de la Terre autour du Soleil ne modifie ni l'éclat des étoiles, ni la grandeur, ni la forme des constellations et se comporte « comme un point vis-à-vis de la sphère des fixes ». Au XVIIIe siècle, en possession d'instruments méridiens précis, les astronomes recherchent des *parallaxes*, c'est-à-dire de minuscules déplacements perspectifs que pourrait provoquer, chez certaines étoiles plus proches que les autres, la circulation annuelle de la Terre autour du Soleil. La figure page 18, semblable à la précédente, montre le principe de la recherche des parallaxes. Cette fois, au lieu de Paris-Cayenne, on prend pour « base », au sens trigonométrique du terme, le diamètre de l'orbite terrestre, c'est-à-dire 300 millions de kilomètres. Les étoiles sont si loin-



Une opposition de Mars : la Terre et la planète Mars, en décrivant leurs orbites autour du Soleil, viennent à se trouver alignées sur le Soleil et du même côté. C'est alors que la distance qui sépare les planètes est à un minimum.

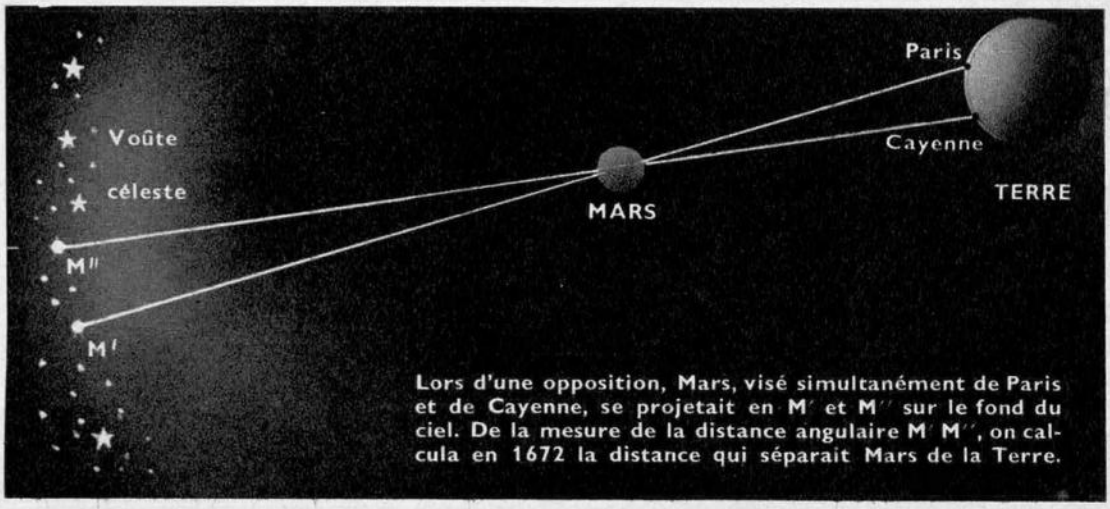


Les lois de Képler : les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe un foyer; le rayon vecteur qui va du Soleil à la planète balaie des aires égales en des temps égaux (ici les aires ASB et CSD, par exemple); les carrés des durées de révolution sur les orbites sont proportionnels aux cubes des grands axes.

taines que, même pour la plus proche, α du Centaure, l'angle ne dépasse pas 1″5. (C'est l'angle sous lequel on verrait, de Paris, un habitant de Moulins se tenant debout!). On nomme d'ailleurs parallaxe la moitié de ce déplacement perspectif : la parallaxe d'alpha du Centaure est 0″75 ; c'est la plus grande parallaxe connue.

Mais, en cherchant des parallaxes, Bradley découvrit, dans la première moitié du XVIII^e siècle, deux phénomènes beaucoup plus « gros » et jusqu'alors inconnus : l'*aberration* de la lumière et la *nutation* de l'axe de la Terre.

L'aberration est un effet optique dû à la combinaison de la vitesse de la lumière (300 000 km/s) et de la vitesse de révolution de la Terre sur son orbite (30 km/s); elle fait osciller les étoiles de 20″ chaque année de part et d'autre de leur position moyenne. Quant à l'axe de la Terre, rappelons qu'il fait avec la normale au plan de l'orbite terrestre un angle de 23°27′ (cette inclinaison est à l'origine des saisons) et décrit autour de cette normale un cône en vingt-six mille ans (c'est la « précession des équinoxes » découverte par Hipparque); la nutation fait décrire à l'axe



Lors d'une opposition, Mars, visé simultanément de Paris et de Cayenne, se projetait en M′ et M″ sur le fond du ciel. De la mesure de la distance angulaire M′ M″, on calcula en 1672 la distance qui séparait Mars de la Terre.

terrestre, en un peu plus de dix-huit ans, une petite ellipse qui vient festonner la circonférence parcourue en vingt-six mille ans sous l'effet de la précession et apporte ainsi 9″ d'oscillation.

Une fois corrigées les influences de l'aberration et de la nutation, les recherches déjà si fines de parallaxes stellaires devaient échouer pendant un siècle encore (jusqu'en 1838). Mais, dès le temps de Bradley, cet échec même montrait que la lumière met plus d'une année à nous parvenir de toute étoile, tandis qu'elle parvient du Soleil à la Terre en huit minutes (Rœmer, 1678). Si le Soleil était aussi loin de nos regards que les étoiles, son éclat ne serait-il pas aussi faible que le leur? Halley eut le mérite de souligner, à la fin de sa vie, ce fait essentiel.

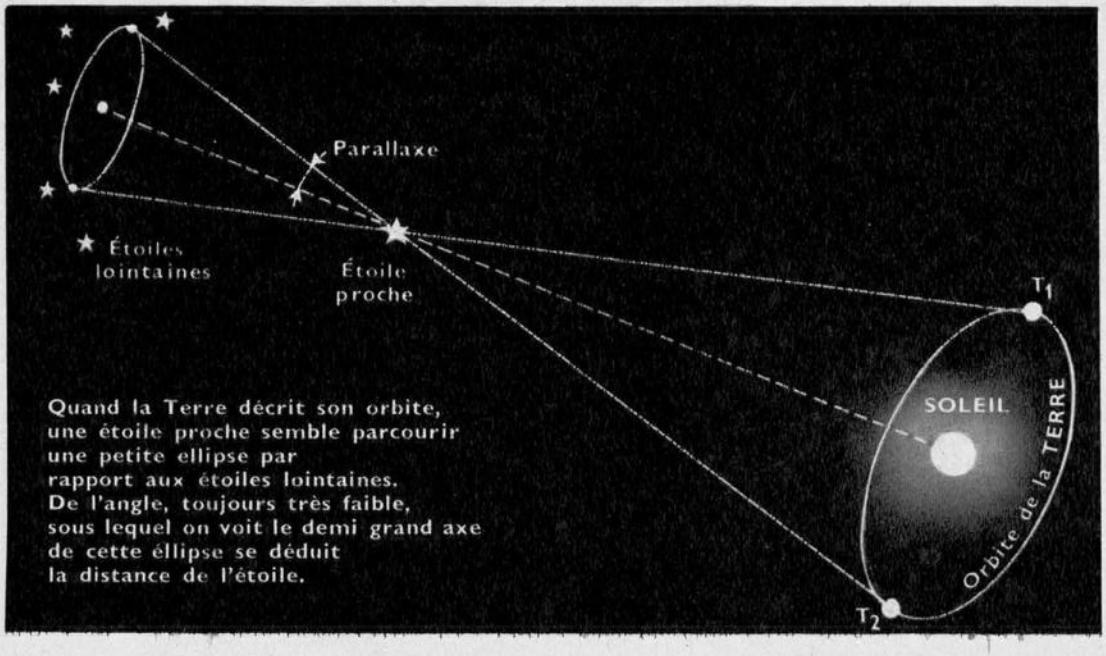
L'astronomie stellaire

Jusqu'au XVIII^e siècle, l'astronomie fut l'étude du système solaire seul. Au cours du XVIII^e siècle, les étoiles commencent à participer au jeu et leur étude, au siècle suivant, envahit la science du ciel.

Dans la première partie de notre XX^e siècle l'étude des étoiles et de leurs grandes agglomérations, les galaxies, monopolise l'activité des observatoires au détriment des planètes.

Signalons toutefois un regain d'intérêt récent en faveur des planètes, grâce à un précurseur comme Bernard Lyot, qui instaure une physique planétaire et surtout grâce aux promesses de l'exploration spatiale.

En 1610, quand Galilée tourne vers le ciel sa première lunette, la révélation est prodigieuse : des myriades d'étoiles que l'œil nu n'avait jamais soupçonnées peuplent le champ de l'appareil et transforment l'aspect immémorial des constellations; leur nombre s'accroît vite avec le calibre de l'objectif. Quelle nouvelle atteinte à l'égocentrisme de l'homme : tant d'astres restés invisibles à tant de générations et dont la lumière et la beauté n'étaient point destinées alors à la Terre! En 1718, Halley découvre les premiers mouvements propres stellaires. En comparant les positions anciennes de plusieurs belles étoiles aux positions qu'il observe, il



Quand la Terre décrit son orbite, une étoile proche semble parcourir une petite ellipse par rapport aux étoiles lointaines. De l'angle, toujours très faible, sous lequel on voit le demi grand axe de cette éllipse se déduit la distance de l'étoile.

Isaac Newton (1643-1727)

Né à Woolsthorpe (Lincolnshire, Angleterre) l'année même de la mort de Galilée, Newton occupe encore de nos jours la première place en Astronomie. Son livre des « Principes » se range parmi les plus hautes productions de l'esprit humain. Ayant fondé la Mécanique sur trois principes simples (principes de l'inertie, des accélérations, des réactions) il montre qu'une loi unique, la Gravitation universelle, explique à la fois le mouvement des astres et celui des projectiles terrestres. Cette loi de Newton est la première explication causale des phénomènes naturels. Elle a servi de modèle pendant plus de deux siècles à tous les développements rationnels de la science. Les découvertes de Newton dans le domaine de l'optique (le télescope, l'analyse spectrale de la lumière) sont à la base de l'Astrophysique contemporaine. En mathématiques, son œuvre est capitale et il est, en particulier, un des créateurs du calcul différentiel.

décèle dans quelques cas des écarts supérieurs à ceux qu'on peut attribuer aux erreurs d'observation. Il annonce en particulier que Sirius, Arcturus et Aldébaran ont bougé au cours des siècles : les deux premiers mouvements ont été confirmés. Ainsi prend fin le dogme de la fixité des étoiles : les étoiles sillonnent l'espace et, malgré l'éloignement, leurs trajets finissent, avec les siècles, par devenir sensibles à notre perception.

Pour les Anciens, les « fixes » étaient aussi des corps « purs », sans défauts et invariables. Les Chinois semblent avoir reconnu à l'œil nu les taches du Soleil. La lunette ne laisse aucun doute sur leur existence, ni sur la rapidité de leurs transformations. L'apparition et l'extinction des étoiles nouvelles, dont font mention les plus vieilles chroniques, trahissent des modifications violentes et soudaines chez certains astres. D'autres étoiles, sans être le théâtre de cataclysmes aussi nets, présentent des variations d'éclat périodiques, plus significatives encore. Dès 1596, Fabricius signale les changements rythmés d'une merveilleuse étoile de la Baleine (Mira Ceti). Depuis cette époque, des milliers de « variables » se sont inscrites dans les catalogues. Au reste, toute étoile rayonne de la lumière et de la chaleur, donc se transforme.

Ainsi ont disparu l'un après l'autre les parfaits attributs dont l'imagination avait paré les corps célestes : les étoiles, quittant l'empyrée, entrent dans la physique.

Le fondateur de l'astronomie stellaire : William Herschel

Herschel doit ses premiers succès à un grand progrès instrumental : il construit de très gros télescopes à miroir de bronze (aujourd'hui désuets) dont la luminosité dépasse de loin celle des lunettes de l'époque et permet d'observer des astres beaucoup plus faibles. Encouragé par la découverte d'Uranus, ce musicien de profession consacre à l'astronomie les quarante dernières années de sa vie.

Ses recherches les plus remarquables concernent la Voie Lactée; elle se présente comme un anneau d'étoiles, mais dès 1750, Wright soupçonne que l'apparence est trompeuse : il s'agit d'un disque immense peuplé d'étoiles, la *Galaxie*, où le Soleil et toutes les étoiles visibles sont plongés. Herschel entreprend de vérifier cette conception au moyen de sondages qu'il appelle des « jauges »: il en fit trois mille. Dans ces jauges, on voit la population du ciel croître régulièrement vers la Voie Lactée, à mesure qu'on s'adresse

Herschel (1738-1822)

Né à Hanovre, Herschel passa toute sa vie d'adulte en Angleterre. Musicien professionnel, puis fabricant d'instruments d'optique, astronome et enfin directeur d'observatoire, il fut le fondateur génial de l'Astronomie stellaire. Ayant su construire de sa main des télescopes puissants de grande ouverture, il découvre la planète Uranus, sonde la Voie Lactée et précise sa vraie nature, découvre le mouvement du Soleil vers l'Apex, les étoiles doubles et leurs orbites newtoniennes, publie le premier grand catalogue de nébuleuses. Parmi ces nébuleuses, Herschel sut établir la distinction fondamentale et reconnaître que les unes étaient de simples nuages de gaz (nébuleuses irrégulières) et que d'autres étaient des amas d'étoiles très éloignés de nous et semblables à notre Voie Lactée. Il eut la chance de pouvoir, aidé par sa sœur Caroline, consacrer quarante années de sa vie à l'observation du ciel. Son génie patient fit le reste.

à des astres plus faibles. Il n'y a aucune coupure : la Voie Lactée traduit l'accumulation, dans le plan d'un disque, de milliards d'étoiles lointaines.

Herschel est l'auteur du premier grand catalogue de nébuleuses (qui en contient deux mille cinq cents). La plupart de ces nébuleuses sont des amas d'étoiles : Herschel eut l'intuition que certaines d'entre elles pouvaient être extérieures à notre Galaxie et de taille comparable. (Wright, Kant ont aussi prophétisé les galaxies extérieures.) Après avoir cru que toute nébuleuse était un amas d'étoiles, Herschel comprend que les nébuleuses de forme irrégulière sont en général des nappes de gaz : il y en a quelques centaines dans son catalogue.

Herschel découvre aussi le mouvement propre qui porte le Soleil et tout le système planétaire avec lui, à raison de 20 km/s, vers la constellation d'Hercule (Apex).

Enfin, Herschel fonde l'astronomie des *étoiles doubles*. Jusqu'à cette époque, on supposait que les hasards de la perspective seuls associaient en couples les étoiles très voisines. Herschel eut l'idée, en 1780, de profiter de ces couples pour découvrir des mouvements propres ou même des parallaxes (si l'une des étoiles est très lointaine et fixe, un déplacement relatif du compagnon sera plus facile à déceler qu'un déplacement absolu). Herschel recense donc des couples. Vingt ans après, en 1800, révisant ses couples, il découvre avec surprise que souvent les deux composantes ont bougé. Il les suit et, en 1820, il a reconnu des arcs elliptiques : ces astres étaient physiquement liés. Aujourd'hui, on a observé plusieurs ellipses képlériennes complètes : chacun des deux astres tourne autour du centre de gravité du couple. Ainsi s'étendent à tout l'Univers les lois de Képler et de Newton établies pour le système solaire.

Les distances des étoiles

En 1838, il n'y a guère plus d'un siècle, fut découverte la première distance stellaire; celle de l'étoile 61 du Cygne (par Bessel); sa lumière met onze ans à nous parvenir. La méthode qui la fournit, dite des « parallaxes trigonométriques » a déjà été décrite.

Avant 1840, deux autres distances étaient publiées : celle de Véga, α de la Lyre (25 années-lumière environ) et celle de notre plus proche voisine, α du Centaure (un peu plus de 4 années-lumière). Ce dernier résultat met en évidence la puissante unité et le grand isolement du système solaire : la lumière issue du Soleil

traverse en moins de six heures le domaine des planètes connues et voyage ensuite dans le vide pendant plusieurs années avant d'aborder une autre étoile.

Les mesures de distances ont été rares jusque vers la fin du XIX^e siècle, où la photographie a permis d'accélérer le travail et d'améliorer la précision. Aujourd'hui, nous connaissons, par le moyen direct déjà décrit, environ 10 000 distances, qui concernent les étoiles situées à moins de 300 années-lumière du Soleil. Ce sont donc des étoiles relativement proches. La méthode ne permet pas d'aller plus loin : quand l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales inévitables dépasse la parallaxe à mesurer, le résultat perd toute valeur. Les parallaxes trigonométriques inférieures à 0'' 005 n'ont pratiquement pas de signification.

L'Univers de 1900

Les connaissances cosmologiques en l'an 1900 étaient encore bien pauvres. Nous pouvons en demander une image au livre « The Stars » de Simon Newcomb, l'astronome sans doute le plus célèbre de l'époque.

Le Soleil est considéré comme à peu près central dans le système stellaire galactique. A ce système discoïdal, on attribue, en diamètre, 6 000 années-lumière. Les nébuleuses, plus nombreuses vers les pôles de la voie lactée, semblent à plus de 30, ou même à plus de 300 années-lumière. Elles présentent un spectre de raies brillantes. (Huggins, vers 1860, avait découvert les raies brillantes de la nébuleuse gazeuse d'Orion.) *La nébuleuse spiralée, Messier 31 d'Andromède, qui présente un spectre continu, semble une curieuse exception. En dehors du système galactique, on n'imagine rien.*

Seuls quelques audacieux, se souvenant des conceptions du XVIII^e siècle (Kant, Herschel) imaginent l'existence de systèmes stellaires extragalactiques, dont Messier 31 et les nuages de Magellan pourraient être des exemples, et vont jusqu'à soupçonner que notre Galaxie pourrait être une nébuleuse spirale comme Messier 31. Naturellement, l'héliocentrisme de 1900 rappelait trop le géocentrisme dont les Anciens n'avaient pu se défaire pour ne pas troubler les esprits. «Ne sommes-nous pas victimes d'une erreur semblable à celle de Ptolémée ? » écrivait Newcomb.

La mesure des distances par la photométrie

L'astronomie est redevable de tous ses renseignements de longue portée à une méthode physique, la méthode photométrique, dont voici le principe. Supposons que nous connaissions l'éclat *absolu* d'un astre, c'est-à-dire la puissance de son débit énergétique (en kilowatts par exemple); ainsi le Soleil débite en permanence 4×10^{23} kW (en langage courant, si l'on peut dire, 400 000 milliards de milliards de kW). Soit M un nombre conventionnel nommé *magnitude absolue*, qui représente cette puissance. Observons maintenant l'éclat *apparent* de cet astre, c'est-à-dire l'énergie venue de l'astre que nous recueillons à la surface de la Terre sur un écran. Soit m le nombre (magnitude apparente) qui représente cet éclat dans le système conventionnel d'unités utilisé déjà pour M. Il est clair que la confrontation de m et de M nous renseigne sur la distance de l'astre (à condition que l'espace soit transparent), car l'éclat apparent décroît en raison du carré de l'éloignement de la source lumineuse. Dans le système usuel des magnitudes, la différence m-M, nommée *module de distance*, fournit aux astronomes la distance cherchée. Exemple : un module égal à 5 correspond à une distance de 326 années-lumière; un module 10 correspond à 3 260 années-lumière, etc.

Pour que la méthode soit intéressante, encore faut-il que l'on connaisse *à priori* l'éclat absolu de certains astres, faciles à identi-

fier et visibles de très loin. Par chance, l'astronome sait identifier d'après leur spectre certaines étoiles géantes (cent fois plus lumineuses que le Soleil) et certaines supergéantes (dix mille fois plus lumineuses que le Soleil). Ces étoiles standard, qui sont pour l'étude du ciel l'équivalent des balises et des phares pour la navigation, permettent de connaître la distance des amas d'étoiles où elles se trouvent. On peut alors calibrer la luminosité totale de ces amas et s'en servir comme d'objets standard plus puissants, une fois que l'éloignement aura confondu leurs étoiles composantes et qu'ils n'apparaîtront plus à leur tour que comme de faibles taches pâles, ou même comme de simples points lumineux.

Aux confins de l'Univers

En calibrant ainsi, de proche en proche, des astres de plus en plus lumineux, l'astronomie a pu descendre par étapes dans les abîmes de l'espace et parvenir aux confins du domaine actuellement connu.

Les causes d'erreur, en chemin, sont perfides et nombreuses. D'abord, l'espace est loin d'être transparent partout, comme l'implique la méthode. En particulier, notre Soleil gravite dans la Voie Lactée, où règne une poussière cosmique. Il faut corriger toutes les mesures, entachées par cette absorption interstellaire dont sont responsables les matériaux cosmiques diffus qui nous entourent.

Ensuite, les étoiles standard sont rares et lointaines. On a beaucoup de difficultés à les calibrer, faute d'en avoir *une* à portée des mesures directes.

Enfin, la difficulté s'accroît avec les grandes distances. Il devient de plus en plus scabreux d'identifier au loin les objets standard et des erreurs faussent parfois les conclusions pour un temps.

Les amas globulaires et notre Galaxie

Le premier bond en profondeur fut accompli, de 1915 à 1920, grâce à Harlow Shapley et à son étude des amas globulaires. Ce sont de puissantes agglomérations stellaires, sphéroïdales, qui gravitent au nombre de plus d'une centaine autour de notre Galaxie. Leur essaim est distribué symétriquement par rapport au centre de la Galaxie elle-même, qui les tient dynamiquement sous sa dépendance (tout comme le Soleil est le centre dynamique du système des planètes). Dans cet amas, Shapley eut la chance de trouver des étoiles variables à courte période, dites RR Lyrae (du nom de la plus connue des variables de cette famille), auxquelles le calibrage attribue la magnitude absolue zéro (M = 0). Autrement dit, les RR Lyrae sont des géantes cent fois plus lumineuses que le Soleil. Grâce aux modules des RR Lyrae, Shapley localisa dans l'espace les amas globulaires, fit un modèle spatial de leur distribution et parvint aux conclusions suivantes, qui firent grand bruit à l'époque (1918) :

1° le centre de gravité du système des amas, qui est le *centre de notre Galaxie*, se trouve très loin du Soleil, à 30 000 années-lumière dans la direction du Sagittaire, où s'accumulent les nuées stellaires les plus denses;

2° la Voie Lactée, ou mieux notre Galaxie, n'a pas moins de 100 000 années-lumière de diamètre, dans son plan équatorial;

3° le Soleil, fort loin du centre, est une étoile des faubourgs, aux deux tiers d'un rayon du disque galactique à partir du centre.

Nous indiquons ici les nombres rectifiés : Shapley, comme tout le monde à cette époque, ignorant les effets de la « brume » qui garnit notre Galaxie, avait surestimé les dimensions. C'est vers 1930 (Trumpler, Stebbins) qu'on découvrit et qu'on corrigea les effets de la diffusion de la lumière au sein de la Galaxie.

← **La galaxie elliptique NGC 147, dans la constellation de Cassiopée**

Paul Couderc
Astronome titulaire de l'Observatoire de Paris.

MÉTHODES ET INSTRUMENTS

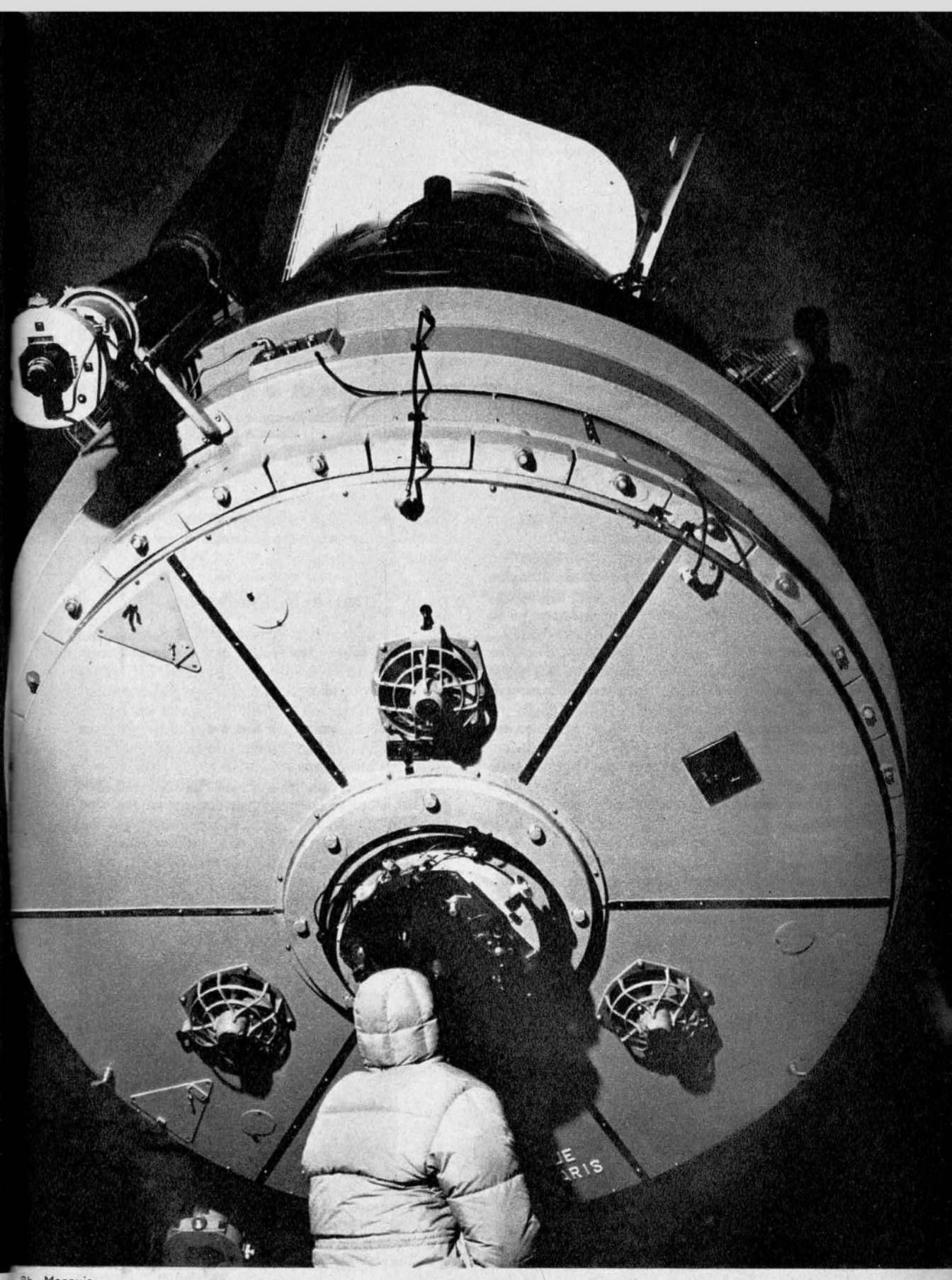
L'ASTRONOMIE est demeurée jusqu'ici une science d'observation, basée exclusivement sur l'étude des rayonnements électromagnétiques reçus des astres. Elle le restera tant que l'homme n'aura pas envoyé des « sondes » ou ne se sera pas rendu lui-même à la surface des autres planètes. Certes, le travail de l'astrophysicien comporte une grande part d'expérimentation, mais celle-ci s'effectue au niveau des instruments de physique, des récepteurs utilisés pour mesurer et analyser les rayonnements en provenance du ciel. On peut dire également que l'astrophysique bénéficie de toutes les expériences terrestres des physiciens sur la matière. Mais jamais l'astronome ne s'est encore promené véritablement dans l'Univers et n'a pu procéder à des expériences sur les corps célestes.

Le temps n'est plus éloigné maintenant où une telle expérimentation deviendra possible, mais elle restera limitée tout d'abord aux planètes du système solaire et au milieu interplanétaire. Les voyages vers les autres étoiles ne sont pas pour si tôt, et nos informations sur l'Univers stellaire resteront tributaires, pendant longtemps encore, de l'étude des rayonnements en provenance des étoiles et des galaxies.

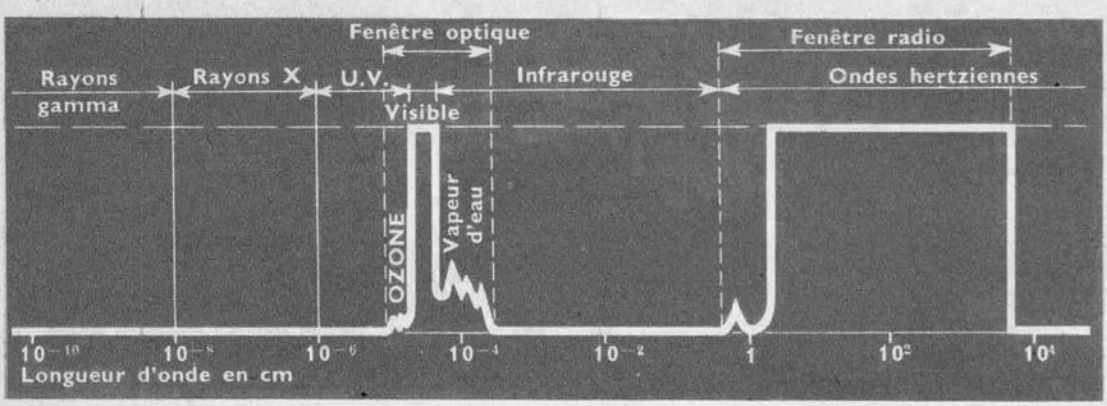
Cependant — et c'est là un point capital — les lancers de fusées et de satellites ont déjà permis à l'homme d'envoyer des instruments de mesure hors de l'écran constitué par l'atmosphère terrestre, écran qui absorbe une grande partie des ondes électromagnétiques extra-terrestres et ne les laisse passer que par deux « fenêtres » étroites dont nous allons parler bientôt : la *fenêtre optique* et la *fenêtre radio*. Les résultats obtenus vont s'étendre à mesure que seront satellisées des stations d'observation astronomique de plus en plus nombreuses et perfectionnées, le but ultime restant l'installation de véritables observatoires sur un corps céleste dénué d'atmosphère (comme la Lune). Mais les découvertes que l'on pourra faire à partir de ces bases seront encore fondées sur la réception et l'analyse des rayonnements en provenance du ciel.

Nous allons décrire ici les instruments et les méthodes d'observation qui permettent l'étude de ces rayonnements, mais en nous limitant aux deux domaines spectraux dans lesquels notre atmosphère est transparente, puisqu'aussi bien il n'existe pas encore de véritable observatoire

Le grand télescope de St-Michel-l'Observatoire (Basses-Alpes) → est le plus puissant d'Europe occidentale (ouverture 1,93 m).



Ph. Marquis



Les messages reçus du ciel : la «fenêtre» optique et la «fenêtre» radio

L'atmosphère terrestre ne laisse passer les ondes électromagnétiques venues du ciel que dans deux domaines de longueurs d'ondes très étroits. On a porté en ordonnées sur cette figure le pourcentage d'énergie qui parvient jusqu'au sol. On voit que la « fenêtre » radio justifie par son étendue l'intérêt de la radioastronomie.

astronomique digne de ce nom construit par l'homme en dehors de notre globe.

Les deux domaines spectraux en question sont fort étroits, comparativement à l'étendue totale du spectre en fréquences des radiations électromagnétiques, comme le montre la figure ci-dessus. Ce sont les rayons lumineux, ceux que voit notre œil, qui sont le moins absorbés. Par contre, les rayons ultraviolets d'une longueur d'onde moindre que 0,29 micron ne nous parviennent pas du tout; ils sont absorbés par la couche d'ozone de notre atmosphère (due à la dissociation et à la recombinaison des molécules d'oxygène sous l'effet de l'ultraviolet solaire). L'infrarouge, lui aussi, est fortement absorbé par l'atmosphère, surtout à cause de la présence de la vapeur d'eau. Cependant, l'absorption n'est totale que dans l'infrarouge lointain, au delà de 20 microns. Dans l'infrarouge proche quelques « fenêtres » (situées entre les bandes de la vapeur d'eau, vers 1,6, 2,2 et 3,5 microns) permettent de recevoir sans trop d'affaiblissement le rayonnement des astres.

Le domaine étroit de longueurs d'onde que nous venons de définir (intervalle de 0,29 micron à quelque microns) constitue la fenêtre dite optique, ainsi appelée parce que les récepteurs utilisés dans ce domaine sont basés sur les lois et font appel aux montages de l'optique. Il existe une autre fenêtre de transparence atmosphérique, plus étendue que la fenêtre optique : c'est la fenêtre radio, limitée par les longueurs d'onde de quelques millimètres à 20 ou 30 m. Ici, les récepteurs sont du type radioélectrique et il en sera parlé plus loin. L'étude du ciel à travers la fenêtre radio constitue la *radioastronomie*, branche récente de l'astrophysique, qui a déjà apporté des résultats extrêmement importants à notre connaissance de l'Univers.

L'astrophysique optique

L'invention des lunettes d'approche remonte au XVII^e siècle. Il n'en fallut pas plus pour que notre vision de l'Univers fût transformée. Braqué vers le ciel, l'instrument nouveau révéla les cirques de la Lune, les taches du Soleil, le diamètre apparent des planètes et leurs phases, les étoiles de la Voie Lactée et les nébuleuses.

Depuis lors, les progrès de l'astronomie ont été intimement liés au perfectionnement des instruments d'optique. Cependant, l'œil est un récepteur imparfait, toujours compétitif, certes, pour l'observation des fins détails d'une image, mais incapable de mesurer les flux lumineux avec précision, aussi bien que d'intégrer dans le temps la faible lumière en provenance d'objets très peu brillants. La plaque photographique et les couches photoélectriques surclassent à ce point de vue l'œil et sont à l'origine de tous les progrès récents de l'astrophysique optique.

D'autre part, si l'œil distingue assez bien la couleur des objets, il reste incapable d'analyser finement la composition de la lumière que nous en recevons. Le spectrographe, associé à la plaque photographique, a rendu possible l'analyse spectrale de la lumière des astres, analyse qui est à l'origine de presque toutes nos informations sur leur composition chimique, leur état physique, leur vitesse d'approchement ou d'éloignement par rapport à la Terre, etc.

Les lunettes astronomiques

Une lunette astronomique est constituée essentiellement de deux groupes de lentilles, centrées sur le même axe (celui du tube de la lunette), mais de dimensions très inégales. Le premier groupe de lentilles constitue l'*objectif :* c'est la pièce maîtresse de l'instrument, celle à laquelle il doit ses qualités. Le diamètre des objectifs astronomiques est en général de l'ordre de quelques décimètres, il atteint 1,02 m pour la plus grande lunette du monde (observatoire américain Yerkes). L'objectif peut être assimilé à une lentille convergente unique; son rôle est de fournir, d'un objet à l'infini, une image réelle en son foyer.

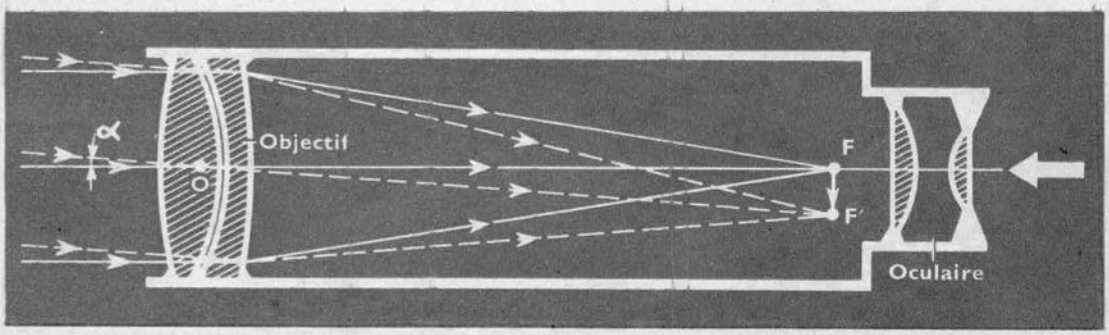
La netteté de l'image implique qu'elle soit dénuée d'irisations, c'est-à-dire que les foyers correspondant aux différentes couleurs soient confondus. C'est la « condition d'achromatisme ». Elle implique également que le foyer des régions centrales de l'objectif soit confondu avec celui des régions marginales (ce qui n'est pas le cas avec les lentilles simples, affectées d'« aberration sphérique »). Ces deux conditions peuvent être satisfaites si l'objectif est constitué de deux lentilles, l'une convergente en *crown*, l'autre divergente en *flint*, dont les faces possèdent des rayons de courbure convenables.

On observe l'image « aérienne » fournie par l'objectif avec un oculaire (convergent) constitué lui-même de deux ou plusieurs lentilles. On démontre que le grossissement obtenu est égal au rapport des distances focales de l'objectif et de l'oculaire. Ainsi, le foyer de l'objectif de la grande lunette de Yerkes atteint 19 m; si on utilise un oculaire de foyer 20 mm, le grossissement obtenu est de 950.

Il semblerait *a priori* qu'il n'y ait pas de limite théorique au grossissement susceptible d'être appliqué à une lunette, et que l'emploi d'oculaires de foyers de plus en plus courts puisse révéler sans fin de nouveaux détails, pour autant que l'objectif soit taillé avec une précision suffisante. En fait il n'en est rien. Si même on fait abstraction de l'agitation atmosphérique qui détruit la perfection des images et dont nous parlerons plus loin, il existe une limite au grossissement utilisable, inhérente à la nature ondulatoire de la lumière : les phénomènes de diffraction interdisent que l'image d'un point lumineux (une étoile, par exemple) soit un point. Le contour de l'objectif étant circulaire, cette image est en fait une petite tache lumineuse ronde, d'éclat maximum en son centre, entourée d'un anneau peu brillant, puis d'un second concentrique au premier et moins brillant encore, etc. Ces apparences s'observent avec un fort grossissement sur une étoile, et pour autant que l'agitation de l'air soit négligeable.

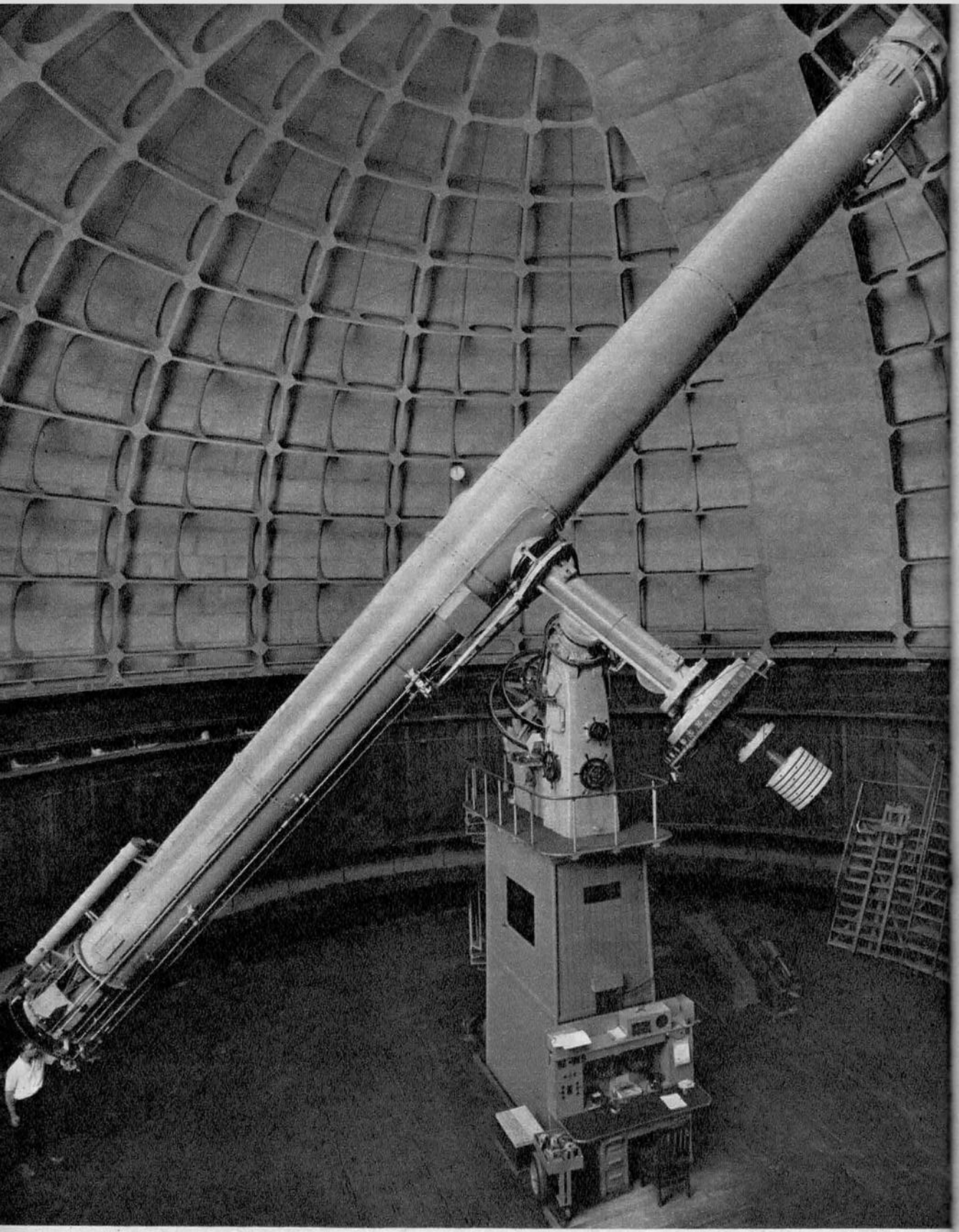
La limite de résolution

Le rayon angulaire du premier anneau noir entourant la tache centrale brillante est inversement proportionnel au diamètre de l'objectif, il ne dépend que du nombre de longueurs d'onde que contient ce diamètre. Ce rayon définit la *limite de résolution* angulaire de l'objectif, c'est-à-dire l'écartement angulaire minimum des deux composantes d'une étoile double que l'objectif permet de voir séparées l'une de l'autre. Autrement dit, les images obtenues sont d'autant plus riches en fins détails, et permettent l'application d'un grossissement d'autant plus fort que l'objectif est lui-même d'un plus grand diamètre. Ainsi le cristallin de l'œil humain, diaphragmé par la pupille, permet de « séparer » deux étoiles angulairement distantes de 1 minute; un petit objectif de 12 cm de diamètre sépare deux étoiles distantes de 1 seconde, un objectif de



Principe de la lunette astronomique et marche des rayons lumineux

Les rayons lumineux parallèles à l'axe optique de l'instrument et qui tombent sur l'objectif vont converger au foyer-image F de ce dernier. Les rayons incidents inclinés de l'angle α sur l'axe optique vont converger en F'. L'image d'un objet situé à l'infini et de diamètre apparent α est ainsi FF', image que l'on observe avec l'oculaire.



La grande lunette de l'Observatoire Lick avec un objectif de 91 cm d'ouverture

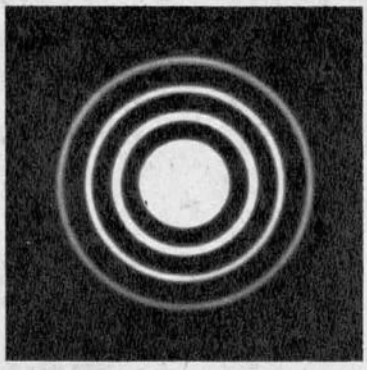
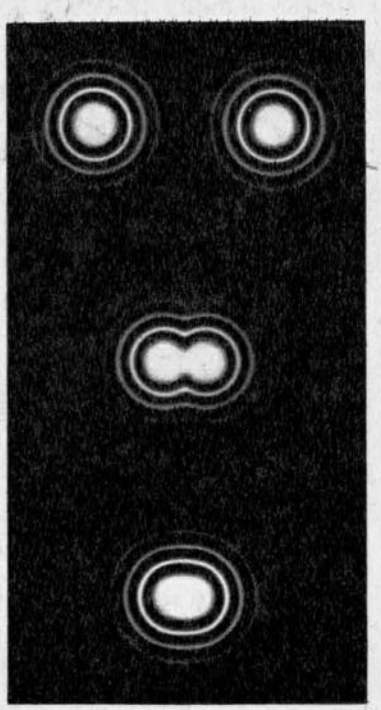


Image de diffraction d'une étoile

Au foyer d'un objectif parfaitement taillé, une source à l'infini, une étoile par exemple, donne une image, ici fortement agrandie, dont le petit disque central ne représente nullement le disque réel de l'étoile ; son diamètre est d'autant plus petit que le diamètre de l'objectif est plus grand, ce qui justifie la course aux grandes ouvertures.



La séparation des composantes d'une étoile double

En haut, les étoiles sont très éloignées l'une de l'autre, les images de diffraction ne se chevauchent pas. Au milieu, la distance des centres est égale au rayon du premier anneau noir ; les étoiles sont à la limite de séparation. En bas, on a une tache unique ovale ; les étoiles sont trop rapprochées angulairement pour pouvoir être séparées.

120 cm de diamètre séparerait deux étoiles distantes de 0,1 seconde, etc. Cette propriété suffirait à elle seule à justifier la course aux grands diamètres en optique astronomique, mais d'autres facteurs jouent également.

En effet, la *clarté* de l'image, dans le cas d'objets d'étendue sensible (comme la Lune et les planètes), décroît très vite quand on applique à une lunette donnée un grossissement de plus en plus fort. Mais, à grossissement égal, une lunette de grand diamètre permet d'obtenir de ces objets des images plus lumineuses qu'une petite lunette.

Dans le cas d'une source ponctuelle (étoile) et pour autant que le grossissement ne soit pas assez élevé pour faire apparaître la tache et les anneaux de diffraction, l'image fournie par une lunette apparaît elle-même ponctuelle. En cette image se trouve concentrée toute la lumière issue de l'étoile et collectée par l'objectif. L'éclat de cette image est donc proportionnel à la surface de l'objectif : les grands instruments ne sont pas seulement des systèmes grossissants, mais aussi des collecteurs de lumière, permettant de révéler des étoiles et de lointaines galaxies (quasi-ponctuelles) inaccessibles à des instruments plus petits.

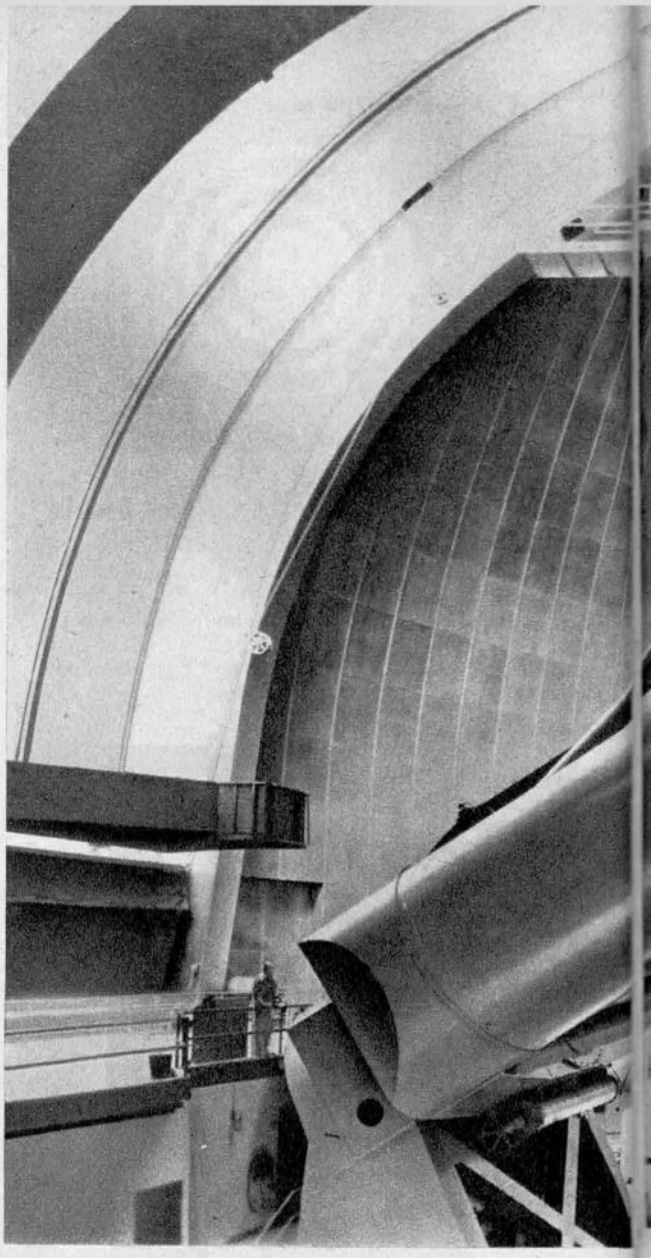
Les télescopes

Les lunettes présentent un certain nombre d'inconvénients. Elles sont fort longues, la bonne correction des aberrations exigeant une distance focale au moins égale à 12 ou 15 fois le diamètre de l'objectif. Elles ne sont achromatiques que dans un intervalle étroit de longueurs d'onde (centré sur le jaune-vert pour les objectifs visuels et sur le bleu-violet pour les objectifs photographiques). Le verre dont sont faits les objectifs doit être d'une homogénéité parfaite et complètement exempt de veines. Enfin, ce verre absorbe les radiations ultraviolettes de longueurs d'onde inférieures à 0,36 micron.

C'est pourquoi les très grands instruments astronomiques modernes sont des *télescopes* qui ne présentent aucun de ces inconvénients. Dans un télescope, l'objectif est remplacé par un miroir réflecteur parabolique, qui donne en son foyer une image complètement dénuée d'aberration chromatique ou sphérique. Cette image peut être renvoyée latéralement sur le côté du tube par un miroir plan, afin d'être observée avec un oculaire. Les miroirs des télescopes sont faits en verre, mais, comme la couche réfléchissante (une mince pellicule d'aluminium déposée sous vide) se trouve sur la face (taillée en paraboloïde) qui est tournée vers le ciel, les défauts internes du verre n'ont

Le télescope géant du Mt Palomar →

On voit ici, pointé presque vers le zénith, cet instrument qui, avec son miroir de 5 m de diamètre, est le plus puissant du monde. Son poids atteint 450 t et la coupole qui l'abrite ne mesure pas moins de 45 m. Sa distance focale peut être portée à 152 m.

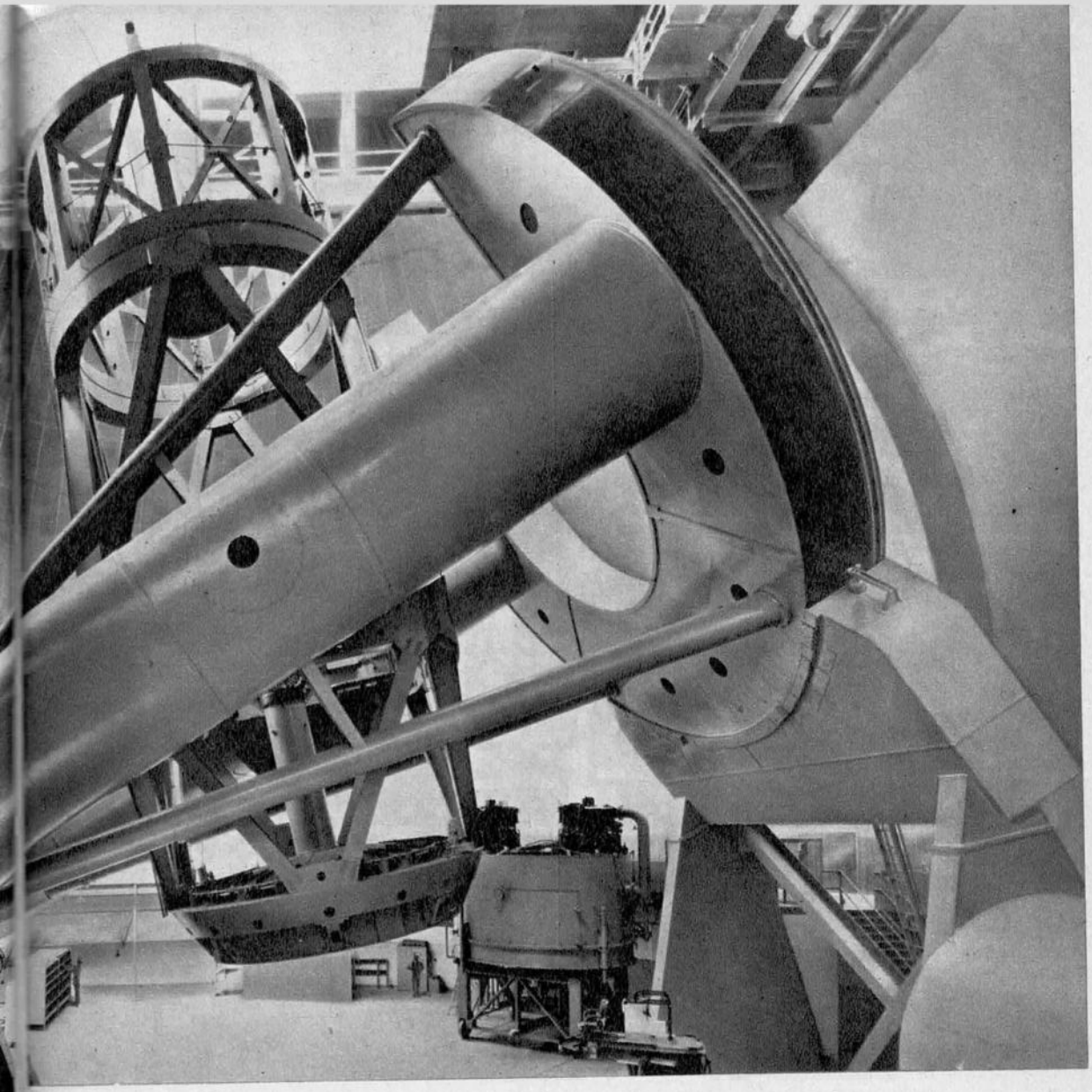


presque plus d'importance et des miroirs de très grand diamètre, jusqu'à 5 m pour le télescope géant de Palomar, peuvent être coulés assez facilement. La pellicule d'aluminium présente en outre l'avantage de réfléchir convenablement l'ultraviolet. Enfin, le tube est court (ouverture relative du miroir : 1/6 à 1/3 seulement de la longueur focale).

Les miroirs et leurs montures

Cependant, les télescopes présentent quelques inconvénients, que l'on peut corriger. Le tube de l'immense majorité d'entre eux n'est pas fermé à son extrémité pointée vers le ciel, contrairement à celui des lunettes, de sorte qu'il s'établit des remous d'air dans ce tube (effet de cheminée) contribuant à brouiller les images tout comme l'agitation atmosphérique elle-même. D'autre part, pour que les images fournies par le miroir parabolique atteignent à la perfection (c'est-à-dire pour que le petit disque entouré d'anneaux décrit plus haut soit visible), le paraboloïde doit être taillé avec une précision d'au moins 1/16 de micron, ou mieux 1/32 de micron. Au contraire, la tolérance pour la taille des lentilles d'un objectif est 4 fois plus forte, les défauts des surfaces agissant alors par réfraction, et non par réflexion. Bien peu de très grands miroirs arrivent à la perfection requise. En particulier les miroirs des deux télescopes géants américains de Lick (3 m de diamètre) et de Palomar (5 m de diamètre) n'y parviennent pas. L'un des rares à y satisfaire est celui de 1,93 m de diamètre du grand télescope de l'observatoire de Haute-Provence, taillé à l'observatoire de Paris par l'astronome André Couder et l'ingénieur Jean Texereau. Enfin, la forme des grands miroirs doit se maintenir malgré les flexions du verre sous l'effet de son poids (qui sont considérables eu égard aux tolérances acceptables), quelle que soit l'orientation du télescope vers le ciel : ce résultat est obtenu en soutenant le miroir par un système de nombreux leviers astatiques.

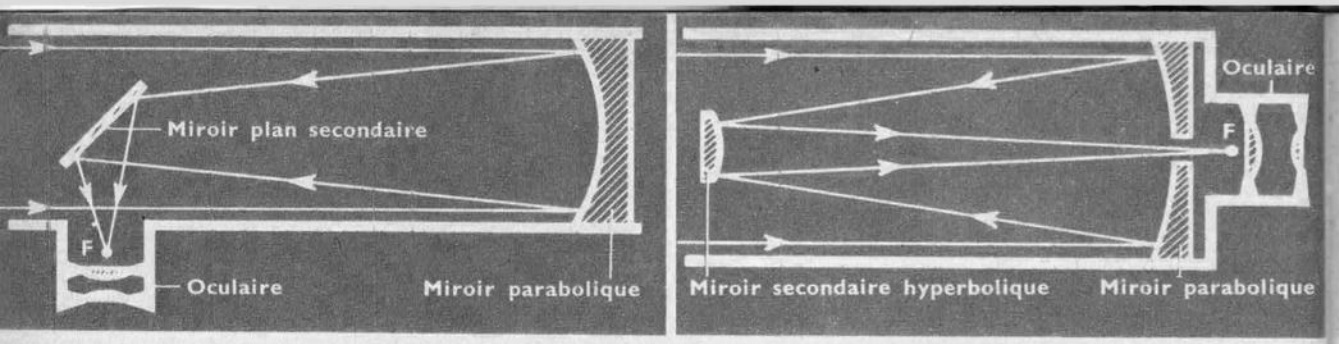
Disons maintenant quelques mots des montures. Tous les instruments astronomiques (à part, bien entendu, les lunettes méridiennes et autres dispositifs destinés à la détermination de l'heure, ainsi que certains petits télescopes d'amateurs) sont montés en *équatorial*, de façon que l'instrument, pointé initialement vers un astre, le suive dans son mouvement apparent autour de la ligne des pôles célestes. Ceci s'obtient facilement au moyen de deux axes de rotation perpendiculaires (nécessaires pour viser tout point du ciel) : l'axe horaire et l'axe de déclinaison. L'axe horaire est parallèle à la ligne des pôles et orienté une fois pour toutes : il est animé d'un mouvement de rotation en 24 heures sidérales dans le sens du mouvement diurne (grâce à un moteur électrique asservi à une horloge astronomique). Une étoile étant pointée, on bloque l'axe de déclinaison et le mouvement de l'axe horaire suffit à maintenir l'étoile dans le champ de l'ins-



trument. Tous les amateurs qui ont utilisé une petite lunette savent le degré de stabilité mécanique nécessaire à l'observation astronomique. On ne s'étonnera donc pas que les montures des grands télescopes modernes pèsent plusieurs dizaines de tonnes et que les piliers massifs qui supportent les coussinets de l'axe horaire soient en béton armé. Au cours de très longues poses photographiques, il est souvent nécessaire de corriger les imperfections du guidage, dues aussi bien aux flexions de l'instrument qu'aux effets de la réfraction atmosphérique. Cela s'obtient avec de petits moteurs auxiliaires très démultipliés agissant en différentiel. On peut aussi laisser le télescope suivre sa marche propre et déplacer seulement, par rapport à lui, le châssis porte-plaque. Un très bon cliché d'un champ d'étoiles requiert un guidage sur le ciel à l'approximation angulaire d'une fraction de seconde d'arc.

Les combinaisons optiques

La combinaison la plus usuelle est la combinaison « Newton », déjà signalée : miroir principal parabolique, miroir secondaire plan renvoyant latéralement l'image. Une combinaison encore plus simple consiste à supprimer le miroir secondaire et à observer direc-



Le principe du télescope et les combinaisons Newton et Cassegrain

On voit à gauche le schéma du montage Newton : un miroir plan secondaire renvoie l'image sur le côté. A droite, le montage Cassegrain : un miroir secondaire convexe, de section hyperbolique, réduit la convergence et allonge la distance focale ; l'observation de l'image s'effectue derrière le trou central du miroir principal.

tement l'image au foyer primaire du miroir principal. Mais il faut alors que ce dernier soit de très grand diamètre de façon que l'observateur, enfermé dans une cabine surplombant le miroir à l'intérieur du tube de l'instrument, n'obture qu'une fraction peu importante du faisceau incident. Cette combinaison est utilisée dans les télescopes de 5 m de Palomar et de 3 m de Lick.

L'ouverture relative, dans la combinaison Newton, est celle du miroir principal (1/3 à 1/6). Si l'on veut allonger la distance focale, la combinaison « Cassegrain » s'impose avec un miroir secondaire hyperbolique dont l'axe coïncide avec celui du miroir principal. Son rôle est d'intercepter les rayons (convergents) issus de ce dernier et de les renvoyer vers lui en un faisceau de convergence moindre. Le miroir principal est en général percé d'un trou central derrière lequel on observe l'image finale. La distance focale résultante est ainsi portée couramment à 15 fois le diamètre (ouverture relative : 1/15). Une variante de la combinaison Cassegrain est la combinaison « Coudé » : la convergence du faisceau réfléchi par le miroir secondaire hyperbolique est moindre encore que dans la combinaison Cassegrain ; ce faisceau, très long, est réfléchi latéralement deux fois par des miroirs plans qui l'envoient dans l'axe horaire (creux) du télescope. L'image est observée en bout de cet axe, à poste fixe, dans une chambre à température constante où l'on peut disposer facilement un grand nombre d'instruments de mesure (spectographes, etc.). Le foyer atteint alors couramment 30 fois le diamètre du miroir principal.

A titre d'exemple, le miroir de 1,93 m du grand télescope de l'observatoire de Haute-Provence est ouvert à 1/5. En combinaison Newton, le foyer vaut donc 9,65 m. En combinaison Cassegrain (interchangeabilité des miroirs secondaires), il est porté à 29 m, et en combinaison Coudé à 58 m.

Nous avons signalé plus haut l'effet de cheminée présenté par le tube ouvert des télescopes. Pour éviter cet effet, beaucoup de grands télescopes comme celui de Palomar ont un tube ajouré, mais cette solution n'est pas parfaite et n'élimine pas les remous d'air à l'intérieur de la coupole. Une solution beaucoup plus efficace, mais qui ne peut s'appliquer qu'à des instruments ne dépassant pas 1,50 m d'ouverture, consiste à utiliser un tube plein, bouché à son extrémité dirigée vers le ciel par une lame de verre optique à faces plan-parallèles. A condition que le bout du tube sorte quelque peu de la coupole (par la trappe ouverte), de façon à être en contact direct avec l'air extérieur, on s'affranchit ainsi de tous les remous d'air parasites et seule subsiste l'agitation atmosphérique proprement dite. Un télescope bouché de 1,05 m d'ouverture destiné aux études planétaires à haute définition est en cours d'installation au Pic du Midi.

Le télescope Schmidt

D'autres types de télescopes peuvent également posséder une lame de fermeture, mais cette lame (qui contribue toujours à éliminer les remous d'air dans le tube) a ici pour rôle essentiel d'accroître l'étendue du champ photographiable en pleine netteté. Un grand miroir parabolique, en effet, couvre sans

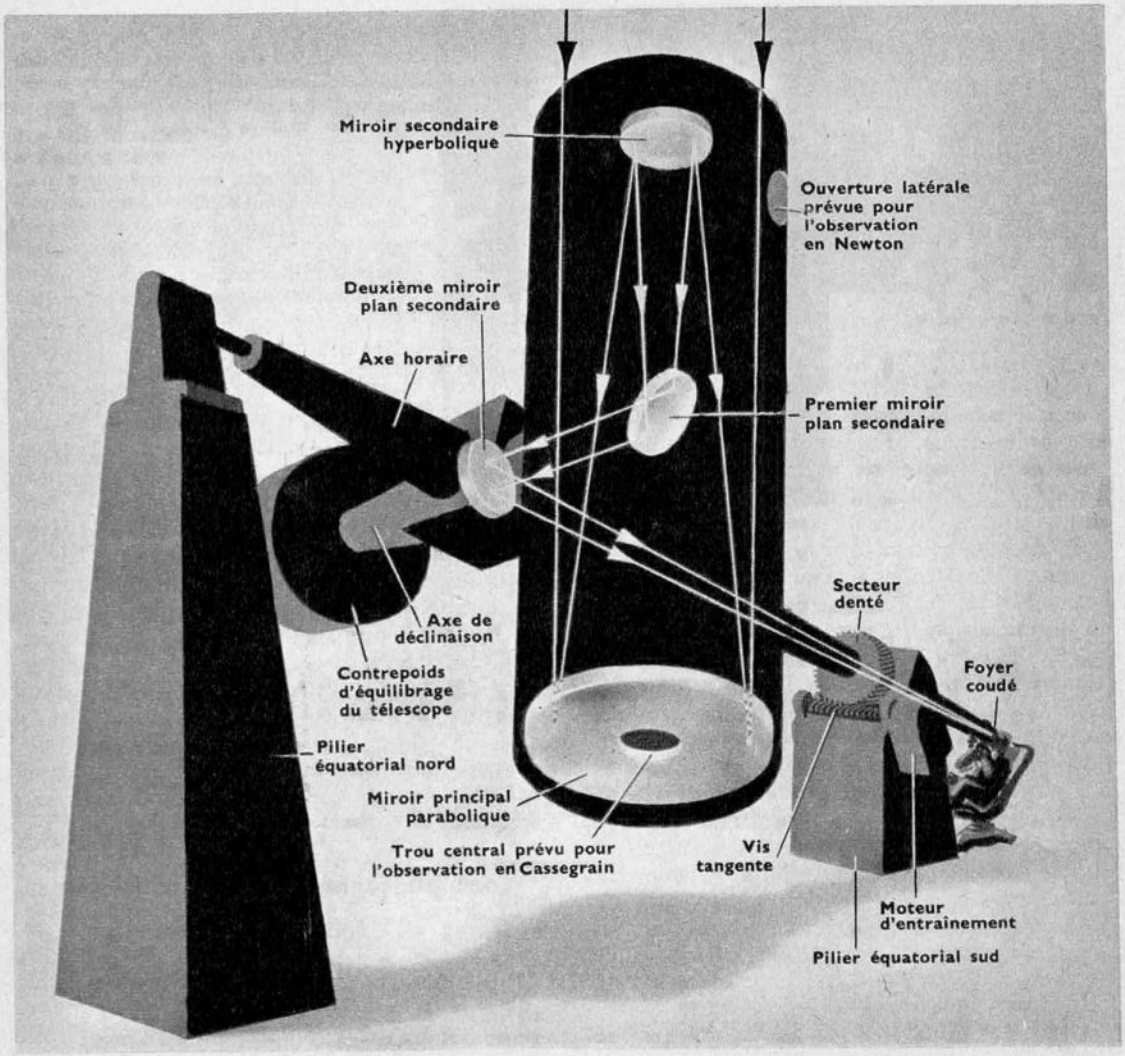
Schéma d'un télescope équatorial →

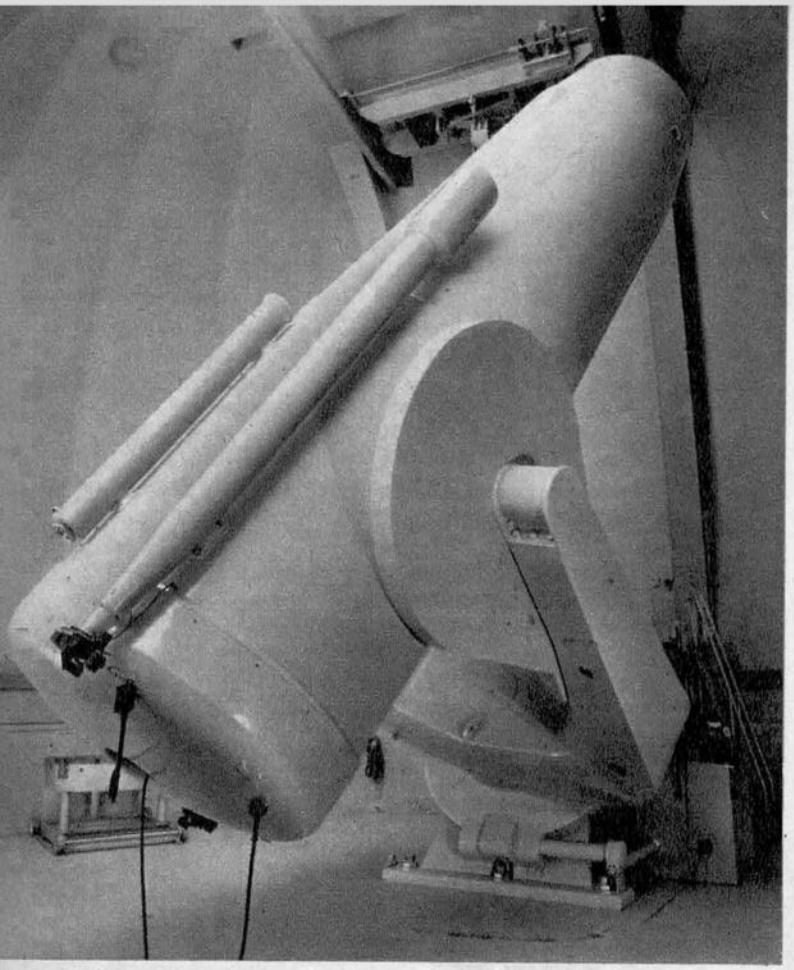
Le tube est porté par un axe incliné parallèle à l'axe de rotation de la Terre, autour duquel il tourne, entraîné par un moteur électrique, pour suivre les étoiles dans leur mouvement diurne. La combinaison optique représentée ici est une variante du système Cassegrain, dite « Coudé », avec deux miroirs plans supplémentaires permettant l'observation en bout de l'axe horaire. Le grand télescope de 1,93 m de Haute-Provence correspond à ce schéma.

aberration un champ ridiculement petit. Dans le télescope photographique de Schmidt, le miroir principal est sphérique et l'aberration inhérente à ce type de miroir est corrigée par une lame de fermeture dont la méridienne est correctement déformée. Le miroir fournit alors des images dénuées d'aberration sur toute l'étendue d'une calotte sphérique concentrique à la surface du miroir. Le champ n'est pas plan, mais il est aisé de déformer légèrement un film photographique pour lui faire épouser la forme de cette calotte sphérique. L'ouverture relative de l'instrument peut être considérable (1/2) et le champ très étendu. On a pu réaliser sur ce type des télescopes de grande dimension dont le plus grand, au Mont Palomar, de 1,20 m d'ouverture, couvre parfaitement toute la surface d'un plan-film de 25 cm de diamètre.

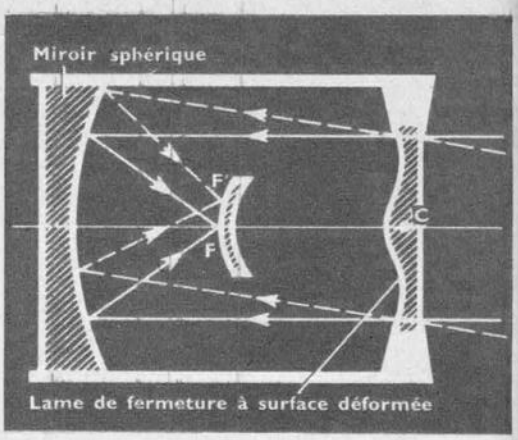
L'agitation atmosphérique

S'il est possible, comme nous venons de le voir, de minimiser les effets de la turbulence de l'air au voisinage immédiat d'un instrument astronomique, il est absolument impossible d'agir sur l'atmosphère elle-même au-dessus d'un observatoire. La turbulence atmosphérique est un phénomène malheureusement important : les veines d'air brassées à différentes hauteurs dans l'atmosphère introduisent, du fait des variations correspondantes d'indice de réfraction, des écarts de marche des rayons lumineux des dizaines de fois supérieurs à ceux laissés par l'opticien. L'onde incidente en provenance d'une étoile, au lieu d'être plane, ressemble à la surface d'une mer agitée. Dans une petite lunette, il arrive que la largeur des « vagues » soit très supé-





Observatoire du Mt Palomar



Le télescope de Schmidt et son principe

Les télescopes classiques à miroir parabolique ayant un champ très étroit, on est conduit à utiliser une formule différente pour explorer de grandes portions du ciel. En particulier, le télescope de Schmidt, illustré ci-dessus, est d'un emploi très général. Le miroir est sphérique et une lame de fermeture à méridienne convenablement déformée corrige l'aberration propre à ce type de miroir. L'image FF' d'un objet à l'infini vient se former à la surface d'une calotte sphérique concentrique au miroir.

rieure à celle de l'objectif; celui-ci reçoit alors une onde plane, d'orientation constamment variable : l'image est agitée mais non pas brouillée. Il n'en va jamais de même avec les très grands télescopes, pour lesquels le pouvoir séparateur théorique ne peut être atteint : l'image d'une étoile, au lieu d'apparaître sous la forme d'un petit disque entouré d'anneaux, est en fait une tache fluctuante beaucoup plus large, présentant une forte concentration de lumière en son centre et des bords très dégradés. Malgré cela, les images sont plus détaillées que dans la petite lunette, mais pas en proportion des ouvertures.

L'agitation atmosphérique impose une limite à l'écartement des petites taches planétaires et des composantes serrées d'une étoile double que l'on peut « séparer »; elle entraîne aussi une augmentation du temps de pose en spectrographie stellaire, puisque c'est l'image d'une étoile élargie par la turbulence que l'on projette en ce cas sur la fente étroite d'un spectrographe.

Quelques rares stations astronomiques de par le monde sont réputées pour la qualité souvent exceptionnelle de leurs images : l'observatoire du Pic du Midi, en France, l'observatoire Lick (Mont Hamilton) aux U.S.A., etc. Nous avons nous-même observé fréquemment des images excellentes à l'observatoire de Haute-Provence. Malheureusement, la station est parfois balayée par le mistral et la turbulence devient alors considérable.

Mais il faut dire qu'un travail astronomique de longue haleine requiert un grand nombre de nuits claires par an : à ce titre, le ciel de Haute-Provence surclasse celui des Hautes-Pyrénées. Il va de soi que tous ces facteurs sont à considérer lorsqu'on choisit le site d'un observatoire.

La photographie astronomique

Il fut une époque où l'observation des objets célestes se faisait exclusivement l'œil à l'oculaire. De nos jours, la photographie a presque entièrement supplanté l'œil, sauf pour certaines observations planétaires.

Les avantages de la photographie en astronomie sont multiples. Tout d'abord, la plaque photographique possède sur l'œil la supériorité d'accumuler les impressions lumineuses, de totaliser les photons. Certes, le rendement « quantique » des meilleures émulsions est faible (0,1 %), mais une exposition de plusieurs minutes seulement sur le ciel révèle déjà nombre d'objets peu brillants que l'observation visuelle est incapable de déceler.

Un second avantage de la photographie en astronomie tient à l'étendue de la sensibilité spectrale des émulsions, qui dépasse celle de l'œil. Toutes les émulsions sont sensibles à l'ultraviolet, et l'adjonction de certains colorants a permis, comme on le sait, de fabriquer des émulsions sensibles jusque dans le très proche infrarouge.

Enfin, un cliché photographique s'étudie au laboratoire dans des conditions bien meilleures qu'une image observée visuellement à l'oculaire d'un télescope. En particulier, les méthodes de photométrie photographique, qui permettent de déduire l'intensité d'une source de la mesure des densités photographiques de son image et de celle d'une source de comparaison (une fois déterminées les courbes de noircissement de la plaque) ont rendu possibles toutes les mesures quantitatives sur l'éclat des objets célestes (photométrie globale) et la répartition de l'énergie dans leur spectre (spectrophotométrie).

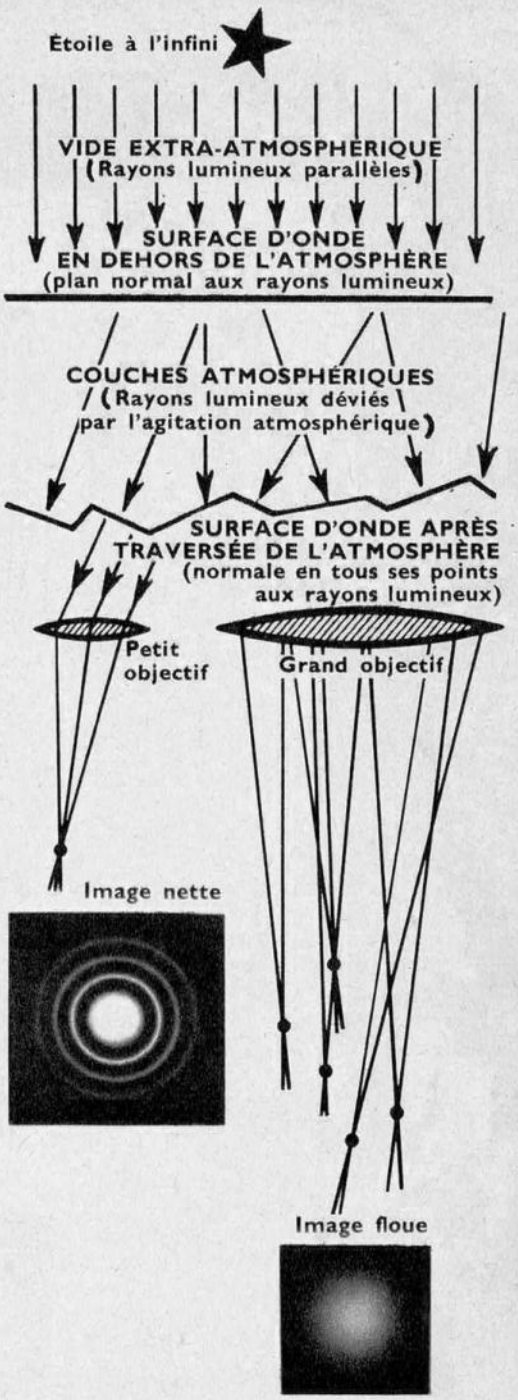
Depuis quelques années seulement, des méthodes rivales basées sur l'emploi de la cellule photoélectrique et de la caméra électronique commencent à supplanter la plaque pour certaines applications.

Champs d'étoiles et nébuleuses

Donnons maintenant quelques précisions sur les conditions dans lesquelles on obtient des photographies astronomiques des différents objets célestes.

Ceux-ci sont d'éclats très différents. La surface de la Lune et des planètes est environ 500 000 fois moins brillante que celle du Soleil; la surface des nébuleuses est considérablement moins brillante encore (de l'ordre de 10 000 fois). En admettant que l'on utilise la même plaque et le même instrument pour photographier ces différents objets, on sera conduit à adopter des temps de pose qui pourront varier dans des rapports considérables.

Commençons par la photographie des champs d'étoiles et de nébuleuses. Il s'agit là d'objets peu lumineux, qui requièrent une grande ouverture relative; la surface sensible est donc disposée au foyer primaire de l'objectif de la lunette ou du miroir du télé-



L'agitation atmosphérique

Après traversée de l'atmosphère turbulente, la surface d'onde incidente provenant d'une étoile n'est pas plane mais bosselée. La portion reçue par un petit objectif est souvent assimilable à un plan et l'image présente alors l'aspect théorique. Avec un grand objectif, il n'en va plus de même, l'image est floue, mais sa condensation centrale est cependant d'un diamètre bien inférieur, de sorte que l'avantage reste en définitive aux grands instruments.

Ph. U.S.I.S.

Le projet américain Stratoscope

On voit ici un technicien faire un dernier examen de la caméra qui va être montée sur le ballon du projet Stratoscope. Le but était de prendre des photographies du Soleil sans être gêné par la turbulence atmosphérique. Le ballon s'élevant à 25 km de hauteur, la caméra fournit des vues exceptionnellement nettes.

scope. L'instrument, dont on a retiré l'oculaire, se comporte alors exactement comme un appareil photographique ordinaire, à cette différence près que ses dimensions sont considérables et peuvent même atteindre au gigantisme, dans le cas des grands télescopes.

Nous avons vu que, compte tenu de la diffraction instrumentale, un petit objectif de 12 cm de diamètre peut séparer deux étoiles distantes au minimum de 1", et qu'un grand miroir de 120 cm sépare deux étoiles distantes de 0,1". Mais à ouverture relative égale le grand miroir forme, en son foyer, une image de ces étoiles dont l'écartement est dix fois celui de l'image fournie par le petit objectif. Finalement, la limite de résolution, mesurée en microns dans le plan focal est la même et ne dépend que de l'ouverture relative. Elle est de l'ordre de 4 microns pour une ouverture relative de 1/6. Or les effets de la diffusion de la lumière dans la couche sensible et la granulation des émulsions rapides ne permettent pas d'enregistrer des détails aussi fins, et par conséquent d'exploiter toutes les possibilités théoriques de l'instrument. A ces effets s'ajoute l'agitation atmosphérique. Insensible sur les photographies obtenues au foyer primaire des petits télescopes, elle vient limiter le diamètre des plus petites images qu'on puisse obtenir au foyer primaire des grands instruments à une valeur à peine inférieure à 1 seconde. On peut dès lors se demander si une augmentation du diamètre des grands miroirs entraîne, au foyer primaire, un gain de pouvoir séparateur photographique effectif. L'expérience acquise avec le 5 m de Palomar permet cependant de répondre affirmativement. Mais l'amélioration obtenue est loin d'être proportionnelle à l'augmentation du diamètre : ainsi les plus petites images photographiques d'étoiles, au foyer primaire du 5 m, mesurent encore 0,7 seconde de diamètre. Il est douteux, pour cette raison, que l'on construise jamais, à la surface de la Terre, un télescope optique d'un diamètre supérieur à 10 m.

Ajoutons enfin que les plaques utilisées pour la photographie des champs d'étoiles ou des nébuleuses doivent être les plus sensibles qui soient. Eastman-Kodak, à Rochester, fabrique de façon artisanale des plaques (ou des plan-films) qui satisfont au mieux à la loi de réciprocité aux très faibles éclairements (1). Ces plaques, sont utilisées par les astronomes du monde entier (y compris ceux d'U.R.S.S.).

(1) On sait que tel n'est pas le cas pour les surfaces sensibles ordinaires dès que l'éclairement devient très faible : un éclairement deux fois moindre nécessite alors, par exemple, un temps de pose triple,

Elles ont permis de diviser par un facteur 10 les temps de pose sur les nébuleuses par rapport aux plaques d'il y a vingt ans. Actuellement, grâce à ces plaques, la plupart des clichés de galaxies lointaines demandent au plus 2 heures de pose au foyer primaire des grands télescopes.

Au delà de cette durée, on ne gagne plus rien, car le fond du ciel nocturne, qui n'est pas noir, commence à voiler la plaque. Pour obtenir une image photographique des objets très peu brillants, il faut alors employer un télescope doté d'un miroir plus grand. A ouverture relative égale, la plaque reçoit, par centimètre carré, un nombre égal de photons en provenance du fond du ciel nocturne, tandis que le miroir collecte un plus grand nombre de photons en provenance de l'objet ponctuel ou quasi-ponctuel faiblement lumineux, et les concentre en une petite région de la plaque, donnant une image détectable. A titre d'exemple, signalons que la magnitude photographique limite atteinte avec le 5 m de Palomar est égale à 23,9. L'éclat apparent des galaxies lointaines ainsi enregistrées est 14 millions de fois plus petit que celui des étoiles de magnitude 6, les moins brillantes que l'on puisse voir dans le ciel à l'œil nu.

Photographie du Soleil

Quittons maintenant les noires profondeurs de l'espace intergalactique et tournons-nous vers le Soleil, le plus brillant de tous les astres pour l'observateur terrestre. La photographie très détaillée de la surface solaire présente de grandes difficultés. En effet, l'agitation atmosphérique est généralement plus forte le jour que la nuit. Fort heureusement, les temps de pose sur le Soleil (en lumière globale ou faiblement filtrée) peuvent être aussi courts qu'on le désire. Cela permet, d'une part, l'utilisation d'une très grande longueur focale, c'est-à-dire la projection, sur la surface sensible, d'une image suffisamment agrandie pour que le grain de l'émulsion ne limite pas le pouvoir séparateur, et d'autre part d'isoler, dans une certaine mesure, certains très brefs instants de calme atmosphérique, lorsqu'ils se produisent.

Avec une petite lunette de 13 cm d'ouverture seulement, Janssen, à la fin du siècle dernier, avait obtenu à l'observatoire de Meudon, sur plaques au collodion, des clichés de portions très agrandies de la surface solaire, dont quelques-uns atteignent à la qualité des meilleures images photographiques obtenues tout récemment sur « Microfile » Kodak dans des observatoires de montagne, avec des instruments beaucoup plus puissants. Mais de telles images sont exceptionnelles en plaine. Schwarzschild et son équipe, aux États-Unis, ont obtenu récemment des clichés de qualité exceptionnelle en fixant un télescope télécommandé de 30 cm d'ouverture à la nacelle d'un ballon stratosphérique (altitude 25 km), de façon à s'affranchir complètement de l'agitation des images.

Photographie des planètes

Nous n'aborderons pas dans ce chapitre le problème de la photographie du Soleil en lumière monochromatique, et nous terminerons par quelques considérations sur la photographie de la Lune et des planètes.

Bien que ces objets soient beaucoup moins brillants que le Soleil, les surfaces sensibles actuelles permettent des poses courtes, de l'ordre de 1/100 de seconde à quelques secondes, selon la planète et l'émulsion choisie. L'exiguïté des détails à photographier (minuscules cratères lunaires, traînées canaliformes sur Mars, etc.) impose un très long foyer. Les clichés ne sont vraiment détaillés que si l'on emploie de grands instruments et si l'on choisit des nuits de très faible agitation atmosphérique.

En prenant un grand nombre de clichés sur une même plaque dans un court intervalle de temps, on peut sélectionner les meilleurs d'entre eux et les « compositer » pour obtenir une image positive unique montrant mieux la forme réelle des petits détails que chaque image individuelle où la turbulence et le grain de la plaque déforment les petites taches; du même coup, le grain apparent de la plaque est diminué.

Les meilleurs clichés de planètes ont été obtenus aux États-Unis à l'observatoire Lowell (Flagstaff), à l'observatoire Lick, à celui de Palomar et, en France, à l'observatoire du Pic du Midi (lunette de 60 cm d'ouverture). L'astronome français A. Dollfus possède, à l'observatoire de Meudon, l'une des plus belles collections du monde de photographies de Mars. La plupart de celles-ci ont été réalisées au Pic du Midi; sur certaines d'entre elles, la limite de résolution atteint 0,3 seconde.

L'analyse spectrale

L'analyse spectrale de la lumière émise par les astres est à l'origine de presque tous les progrès de l'astrophysique au cours du dernier demi-siècle. Nous ne pouvons exposer ici de façon détaillée les lois de l'émission et de l'absorption de la lumière. Rappelons seulement que tout corps (il faudrait dire, avec les physiciens, « corps noir », c'est-à-

dire capable d'absorber complètement tout rayonnement incident) émet un « spectre continu », c'est-à-dire des radiations de toutes les longueurs d'onde. L'intensité globale de ce rayonnement croît avec la quatrième puissance de la température absolue, la longueur d'onde dominante du rayonnement émis étant d'autant plus courte que la température est plus élevée. Les objets qui nous entourent dans la vie courante et qui sont portés à la température ambiante émettent principalement de l'infrarouge (cette émission propre n'a rien à voir avec la lumière visible qu'ils réfléchissent); le filament de tungstène d'une lampe à incandescence rayonne surtout dans le jaune. Une étoile dont la surface est portée à 20 000° émet surtout de l'ultraviolet, etc. La répartition, en fonction de la longueur d'onde, de l'intensité du rayonnement continu d'une source nous indique donc sa température. L'étude de cette répartition constitue la spectrophotométrie. On l'utilise en particulier pour connaître la température superficielle des étoiles.

D'autre part, un gaz transparent, porté à une température suffisante pour que ses atomes soient excités, émet une ou plusieurs radiations monochromatiques (raies d'émission) qui le caractérisent chimiquement et caractérisent également son état physique (degré d'excitation, température, etc...). Si ce même gaz est interposé entre l'observateur et un « corps noir » à température plus élevée que la sienne, le spectre continu du corps noir apparaît assombri (raies d'absorption) à l'endroit des raies monochromatiques que le gaz eût été susceptible d'émettre. La lumière que nous recevons du Soleil et des étoiles, décomposée par le spectroscope, apparaît ainsi sous forme d'un fond continu strié de raies sombres. Le fond continu est émis par la photosphère, c'est-à-dire la couche superficielle lumineuse relativement dense de l'astre; quant aux raies sombres, elles caractérisent, par leur position dans le spectre, les éléments gazeux absorbants de faible densité qui la surmontent (« couche renversante »), et par leur intensité, l'abondance et l'état physique de ces éléments (en fait, ceci est un schéma simplifié : il y a passage progressif de la photosphère à la « couche renversante »).

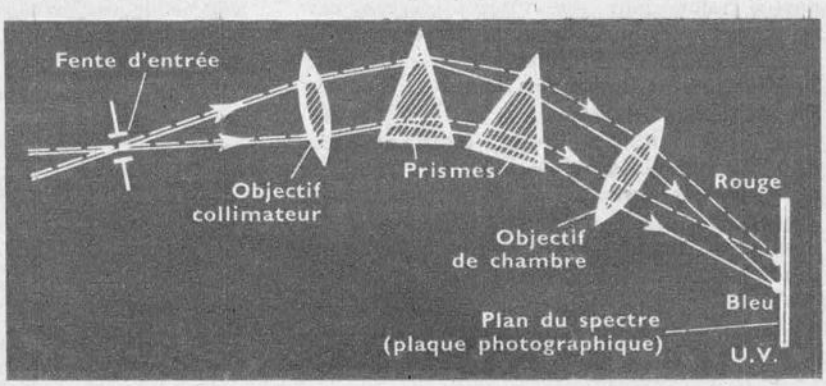
Enfin, la position apparente d'une raie déterminée dans un spectre dépend de la vitesse de rapprochement ou d'éloignement de la source par rapport à l'observateur (vitesse « radiale »). Les raies sont déplacées vers le bleu (ou vers le rouge) si la source se rapproche (ou s'éloigne) de la Terre, et de ce déplacement on peut déduire aisément la vitesse radiale. Si, d'autre part, une étoile tourne rapidement sur elle-même, nous recevons de la lumière non seulement du centre du disque, mais aussi du bord qui se rapproche et de celui qui s'éloigne : les raies sont élargies autour de leur position moyenne, et de la mesure de cet élargissement nous pouvons déduire la vitesse de rotation de l'étoile.

Les spectrographes

Les spectrographes peuvent être à prismes ou à réseau. L'inconvénient des spectrographes à prismes est qu'ils n'étalent pas également le spectre pour les différentes longueurs d'onde, la dispersion étant plus grande pour les courtes longueurs d'onde : le spectre est donc moins étalé, les raies moins bien séparées dans le rouge que dans le violet. En outre, le verre absorbe les radiations ultraviolettes plus courtes que 0,36 micron, ce qui conduit à utiliser des prismes en quartz ou en silice fondue. Mais, de toute façon, l'absorption globale dans la masse des prismes devient prohibitive dès que ceux-ci deviennent très volumineux; or un spectrographe dispersif et séparant bien deux radiations monochromatiques très rapprochées exige des prismes très gros. Pour un résultat identique, les ré-

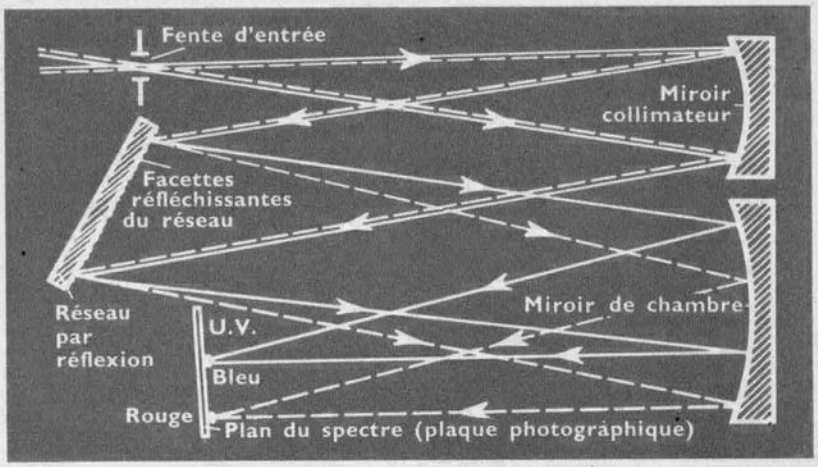
Spectrographe à prisme

Une fente fine placée au foyer de l'objectif est éclairée par la source dont on veut analyser la lumière. Un prisme disperse le faisceau de rayons parallèles ainsi formé et un deuxième objectif fait converger le spectre étalé sur une plaque photographique en son foyer.



Principe du spectrographe à réseau

Dans cet instrument, l'objectif collimateur, de même que l'objectif de chambre, sont remplacés par des miroirs. Ceux-ci ont l'avantage d'être parfaitement achromatiques, ce qui est d'un intérêt primordial en spectrographie. Un réseau dispersif par réflexion, sorte de miroir finement strié, remplace ici les prismes.



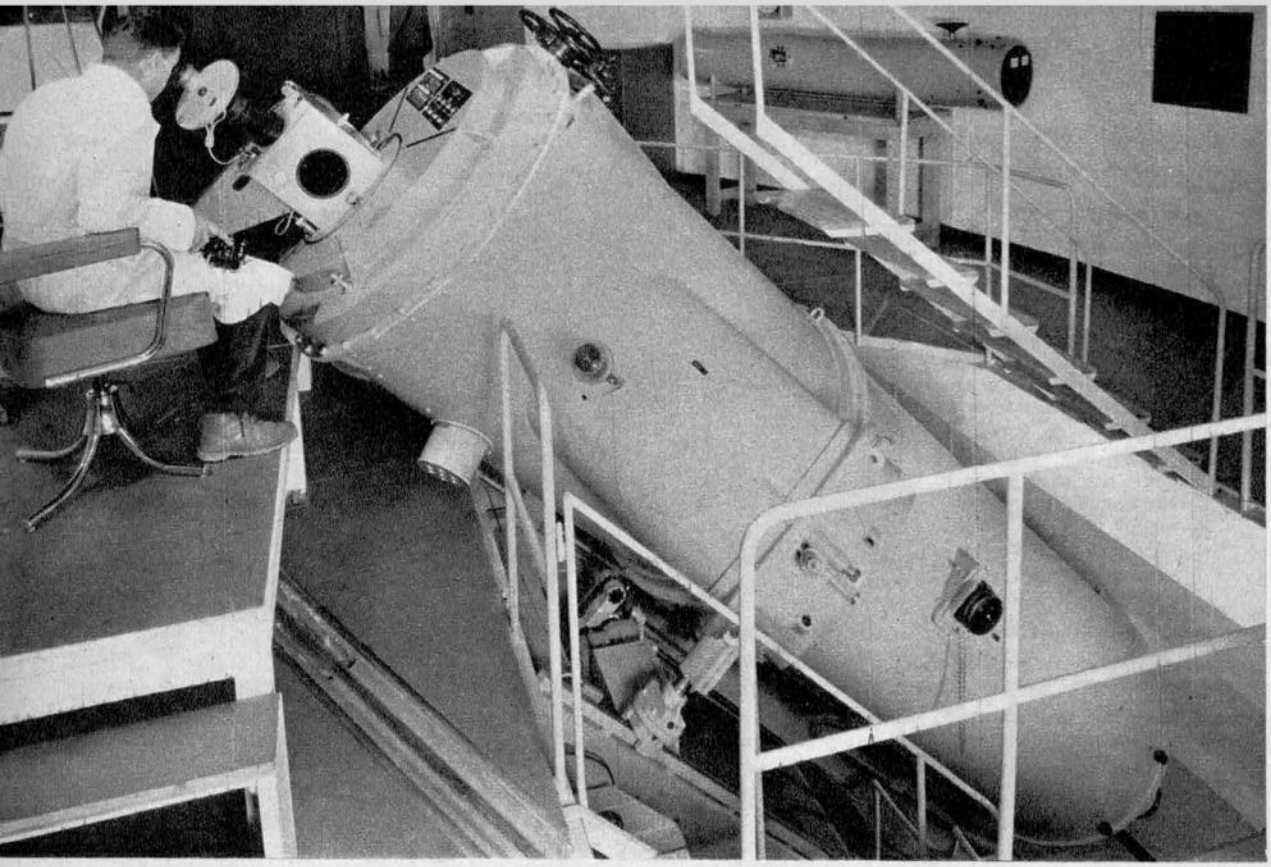
seaux conduisent à des spectrographes beaucoup moins encombrants. Il fut un temps où ils péchaient par leur manque de luminosité et n'étaient guère, pour cette raison, utilisés par les astrophysiciens. Mais on est parvenu à graver des réseaux par réflexion très lumineux et actuellement, sauf pour les études portant sur des objets très faibles (galaxies lointaines) avec une petite dispersion, ou pour certaines études de spectrophotométrie dans un domaine étendu, les spectrographes à réseau sont les plus employés en astrophysique. Les plus gros d'entre eux comportent plusieurs chambres interchangeables et atteignent une tonne.

Bien entendu, la magnitude limite des étoiles ou des galaxies dont on peut obtenir photographiquement le spectre reste très inférieure à celle que l'on atteint en photographie directe au foyer primaire d'un télescope. Il y a plusieurs raisons à cela, mais la principale est la suivante : du fait de l'étalement considérable de la lumière par le spectrographe, le temps de pose permettant d'obtenir le spectre un peu détaillé d'une étoile est au moins 1 000 fois — sinon 10 000 fois — supérieur à celui qui est nécessaire pour photographier l'image de cette étoile au foyer primaire. Or il est impossible, pour des raisons pratiques, de dépasser en spectrographie astronomique 20 à 30 heures de pose réparties en plusieurs nuits, ce qui nous laisse encore loin du compte. D'ailleurs pour qu'un grain de bromure d'argent soit rendu développable, il doit avoir reçu non seulement un nombre suffisant de photons, mais encore les avoir reçus en un temps très court, ce qui n'est jamais le cas lorsque l'image est si faiblement lumineuse qu'elle nécessiterait une pose de 1 000 heures. La plaque photographique présente un « seuil », en deçà duquel aucune image ne peut être enregistrée.

La caméra électronique

C'est ici que la caméra électronique de l'astronome français A. Lallemand, montée derrière un spectroscope, révèle son écrasante supériorité. Le spectre est étalé sur une couche photoélectrique qui émet des électrons en chaque point éclairé; ces électrons, accélérés et focalisés dans le vide, tombent sur une plaque portant une émulsion spéciale sensible aux électrons (plaque corpusculaire) où se reproduit l'image du spectre. La photocathode possède un rendement quantique de 10 % (et parfois 20 %) contre 0,1 % pour les meilleures plaques photographiques. En outre, il n'y a pas de seuil, puisqu'un photon unique (sur 10 photons incidents, dans le cas d'un rendement quantique de 10 %) suffit à éjecter un électron de la photocathode et à produire une trace sur la plaque corpusculaire. Autrement dit, les photons n'ont plus besoin d'arriver par « paquets », comme sur la plaque photographique, pour donner une image. En fait, la plupart des recherches menées avec la caméra électronique ne se font pas en comptant les traces individuelles d'électrons, mais en exposant suffisamment les plaques corpusculaires pour que l'on puisse mesurer le noircissement de l'image, tout comme sur une plaque photographique ordinaire. Même ainsi, le temps de pose est considérablement réduit (de 10 à 100 fois) et on peut obtenir des spectres d'étoiles faibles qui exigeraient, en spectrographie photographique classique, des durées d'exposition absolument prohibitives.

L'avantage de la caméra électronique n'est pas, comme on l'a dit trop souvent et bien à tort, de rendre un télescope de petit diamètre équivalent en luminosité à un télescope de grand diamètre lorsqu'on photographie des



LE GRAND SPECTROGRAPHE du télescope de 1,93 m de l'Observatoire de Haute-Provence. Il est installé au foyer Coudé à poste fixe, ce qui évite les flexions du tube et permet un excellent isolement thermique.

champs d'étoiles, puisque la luminosité du ciel nocturne limite, en tout état de cause, la possibilité pour un télescope donné de montrer des étoiles plus faibles qu'une certaine magnitude, et que seul un télescope plus gros permet de montrer ces étoiles, quel que soit le récepteur utilisé. Le principal avantage de la caméra électronique de Lallemand est de fournir des images ou des spectres avec des temps de pose 10 à 100 fois plus courts que ceux exigés par les meilleures plaques photographiques. Et c'est surtout en spectrographie, où les temps de pose sont extrêmement longs, que cet avantage est décisif.

Cellules photoélectriques, couples thermoélectriques et polarimètres.

Si la caméra électronique est de mise au point récente, et cette mise au point se poursuit encore, la cellule photoélectrique, basée aussi sur l'emploi des couches photoélectriques, est d'une utilisation plus ancienne.

Sauf dans l'infrarouge lointain, où on emploie des cellules au sulfure de plomb, refroidies à l'air liquide, relativement peu sensibles et associées pour cette raison à de puissants amplificateurs à tubes, la technique moderne utilise des cellules à multiplicateurs d'électrons, ou « photomultiplicateurs ». Dans ces cellules, les électrons libérés par la lumière (10 électrons pour 100 photons incidents en moyenne) quittent la photocathode avec une vitesse faible. Accélérés par une tension positive, ils vont frapper une électrode appelée dynode qui, pour chaque électron incident à grande énergie, en émet plusieurs autres. En multipliant le nombre des dynodes (les meilleurs cellules fabriquées dans le laboratoire de Lallemand, à l'observatoire de Paris, et qui sont utilisées dans les observatoires du monde entier, comportent jusqu'à 21 dynodes), on obtient une amplification de plusieurs centaines de millions, sans introduction de bruit de fond supplémentaire. Il est ainsi possible de mesurer avec une bonne précision la lumière d'une étoile si faible que l'œil la voit à peine dans l'oculaire du télescope utilisé. La mesure est rigoureusement proportionnelle au flux lumineux — ce qui n'est pas le cas en photographie — et elle est, de plus, pratiquement instantanée, ce qui

permet de mettre en évidence des variations rapides d'éclat des étoiles variables, que la plaque ne pourrait déceler. Associés à des filtres colorés ou à des monochromateurs (spectroscopes permettant d'isoler telle ou telle radiation monochromatique dans un spectre), les photomultiplicateurs permettent en outre de mesurer rapidement l'éclat des étoiles en différentes couleurs, ce qui fournit une indication sur leur type spectral.

A côté des cellules existent d'autres récepteurs, utilisés par les astronomes principalement en vue de l'étude physique des planètes : les couples thermoélectriques et les polarimètres.

Pour les premiers, il s'agit là de couples minuscules, dont on amène l'une des soudures sur différentes régions de l'image d'une planète fournie par un grand télescope : la mesure du courant émis permet de calculer la température de la région planétaire visée.

Les polarimètres, perfectionnés par B. Lyot et A. Dollfus, ont fourni des indications extrêmement précieuses sur la nature du sol et des atmosphères planétaires, par comparaison avec les propriétés polarimétriques de différentes substances terrestres.

Pierre GUÉRIN
Chargé de recherches à l'Institut d'Astrophysique de Paris.

LA RADIOASTRONOMIE

LES rayonnements radioélectriques qui nous parviennent des corps célestes sont extraordinairement faibles, de l'ordre du milliardième de micromicrowatt par mètre carré de surface. Aussi la radioastronomie n'a-t-elle pu se développer qu'en faisant appel aux acquisitions les plus récentes de l'électronique.

L'intensité de ces rayonnements est si faible qu'il faut concentrer toute l'énergie qu'intercepte une antenne collectrice de grande surface pour que le signal devienne mesurable. Encore le récepteur lui-même produit-il un bruit de souffle, de même nature que le signal reçu, si bien que ce dernier ne peut être distingué que si son intensité est appréciable par rapport au « bruit ».

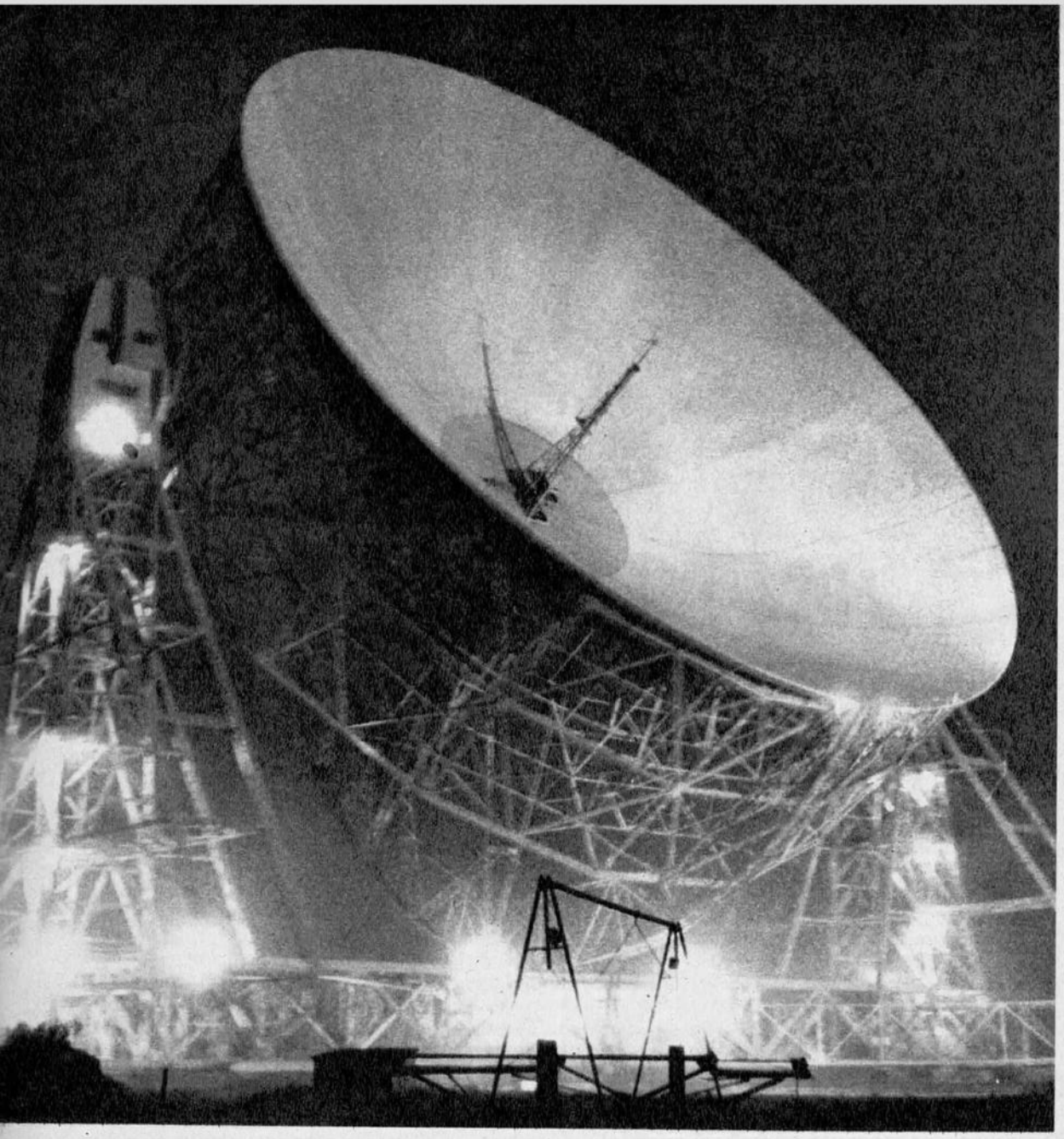
Les miroirs paraboliques

C'est pour cette raison qu'a commencé la course aux grands miroirs paraboliques. Aux États-Unis et en Europe, des dizaines de paraboloïdes de 25 m de diamètre ont été construits. Les Anglais ont réalisé le colosse de Jodrell Bank avec son miroir de 76 m de diamètre. Mais on s'est vite heurté à une difficulté majeure : du fait des rigoureuses tolérances de surface et de la précision de pointage requise, le prix de ces instruments croît comme le cube de leur diamètre.

Les Américains ont commencé l'étude d'un engin de 200 m de diamètre complètement orientable. Il s'est révélé impossible de le construire assez rigide pour qu'il ne se déforme pas de façon intolérable sous l'effet du vent et de son propre poids, évalué à 2 000 t pour le miroir seul. Aussi devait-il être constitué de panneaux indépendants montés sur une structure relativement rigide et ajustés individuellement par un calculateur électronique pour que la forme de l'ensemble se maintienne malgré les efforts. Son prix, estimé d'abord à 200 millions de NF, est passé en quelques années à 500 millions, et l'on n'est pas sûr qu'il sera finalement construit.

Pour diminuer les difficultés d'ordre mécanique, et donc le prix de l'unité de surface collectrice, on a renoncé à pouvoir observer tout le ciel visible à un moment donné. C'est ainsi que le miroir le plus récent, le radiotélescope de Parkes (Australie), de 67 m de diamètre, ne peut viser plus bas que 30° au-dessus de l'horizon. C'est dans le même ordre d'idées que l'on a été amené à recourir à d'autres types d'antennes et à construire des dispositifs semi-méridiens, comme celui de Columbus dans l'Ohio (U.S.A.) ou de Nançay, en France : le champ observable par ce dernier à un instant donné est limité à une bande de 15° de large centrée sur le méridien.

Un radiotélescope est toujours plus sensible dans une direction privilégiée que l'on appelle son axe. Plus la sensibilité diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de cet axe, plus il est facile de distinguer deux sources voisines. Comme en astronomie optique, le pouvoir séparateur, qui exprime la capacité que possède un instrument de séparer deux objets voisins, croît comme les dimensions de l'objectif et ne dépend que du rapport de son diamètre à la longueur d'onde du rayonne-

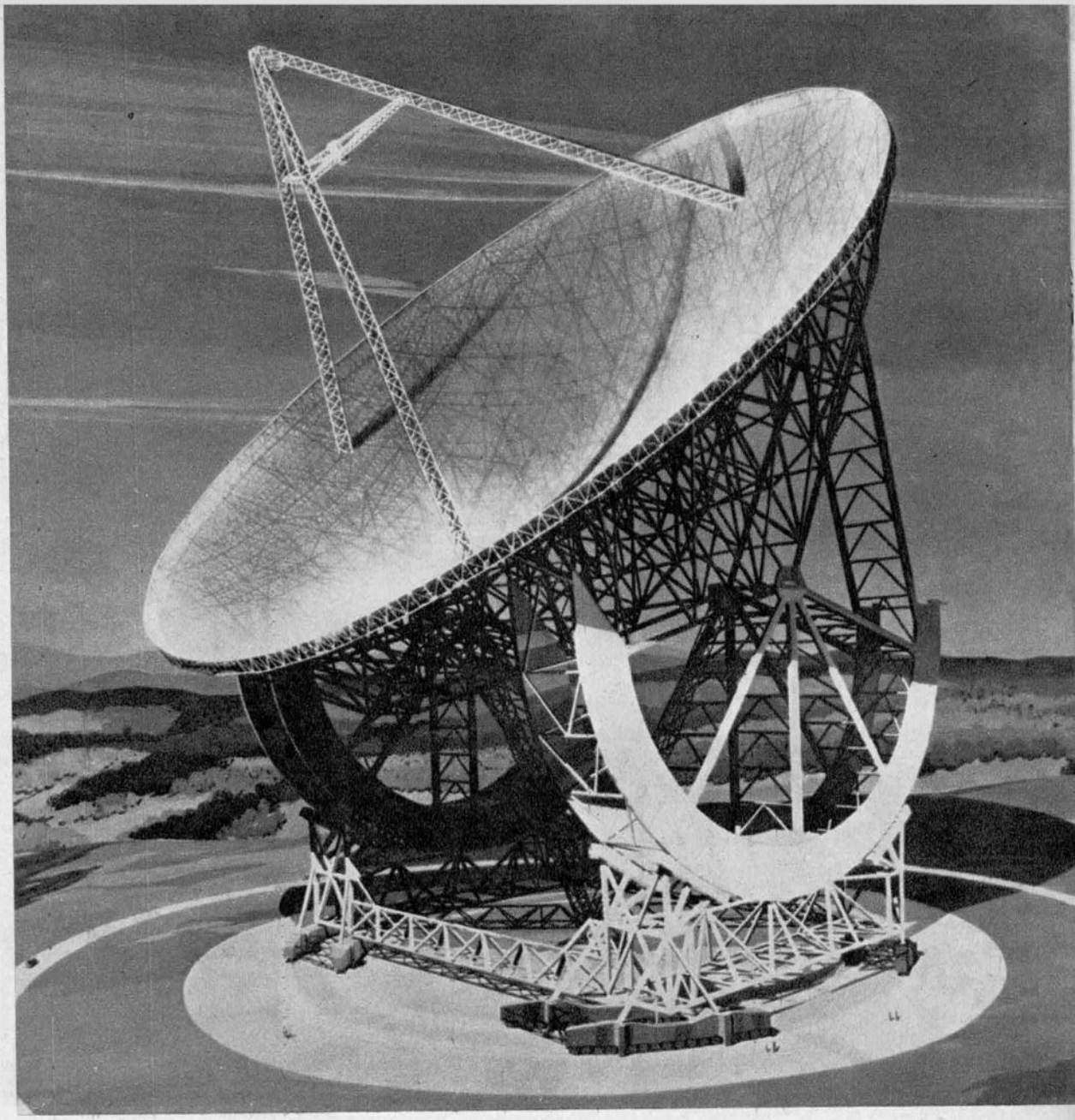


Le radiotélescope de Jodrell Bank En service depuis 1957 près de Manchester, c'est jusqu'ici le plus grand du monde de ce type, avec son réflecteur parabolique de 76 m de diamètre orientable dans toutes les directions et son poids total de plus de 1 200 t.

ment reçu. L'œil humain, avec une pupille dont le diamètre est inférieur à 3 mm, soit 3 000 longueurs d'onde environ de lumière visible, distingue des détails de 1 minute d'arc. Sur 2 m de longueur d'onde, il faudrait un miroir de 6 km de diamètre pour obtenir le même pouvoir séparateur; mais il serait alors assez sensible pour détecter le rayonnement d'un si grand nombre d'objets qu'on ne pourrait plus les distinguer les uns des autres; il serait limité par la confusion. Par contre, sur 2 cm de longueur d'onde, un miroir de 60 m aurait le même pouvoir séparateur tout en ne pouvant détecter que quelques centaines d'objets. Sur ondes très courtes, ceux-ci sont, en effet, beaucoup moins brillants et les récepteurs sont plus bruyants. Notre second instrument sera limité par sa sensibilité.

Les réseaux de dipôles

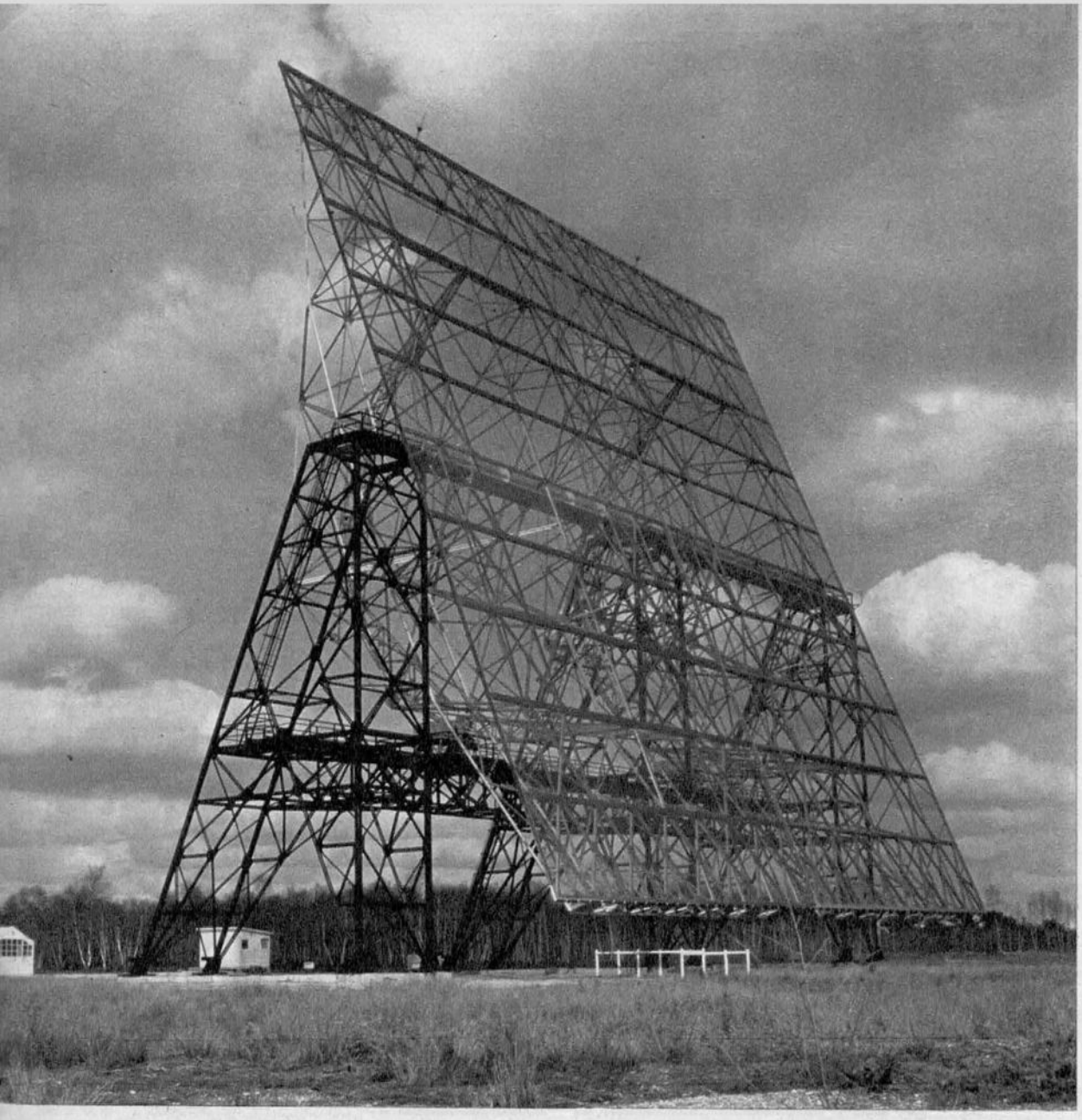
C'est donc surtout sur ondes centimétriques et décimétriques que les grands miroirs sont employés. Mais comme les récepteurs



Le radiotélescope de Sugar Grove

En construction depuis 1959, ce gigantesque instrument sera haut de 220 m, avec un réflecteur entièrement orientable de 200 m de diamètre. Il ne faudra pas moins de 20 000 t d'acier et 600 t d'aluminium pour le réaliser.

s'améliorent rapidement grâce à l'emploi des amplificateurs à faible bruit (les « Maser », par exemple), le domaine des longueurs d'onde où l'on est limité par la confusion tend à s'élargir vers les ondes courtes. D'où le développement d'antennes de types nouveaux inventées spécialement pour la radioastronomie. On emploie des antennes très allongées ou des réseaux, car il faut porter une dimension au moins à plus de 1 km. Un tel aérien, constitué par des alignements de dipôles avec ou sans réflecteurs, n'est directif que dans le plan contenant sa plus grande dimension. Si le réseau est orienté est-ouest, il ne perçoit que les radioétoiles situées dans une bande étroite voisine du méridien du lieu et, à l'intérieur de cette bande, il ne fait aucune différence entre une source haute et une source voisine de l'horizon. Pour faire cette distinction, un second réseau, orienté nord-sud, est nécessaire. Au moyen de circuits électroniques spéciaux on peut même ne détecter que les radiosources situées dans une zone étroite, commune aux deux bandes perpendiculaires

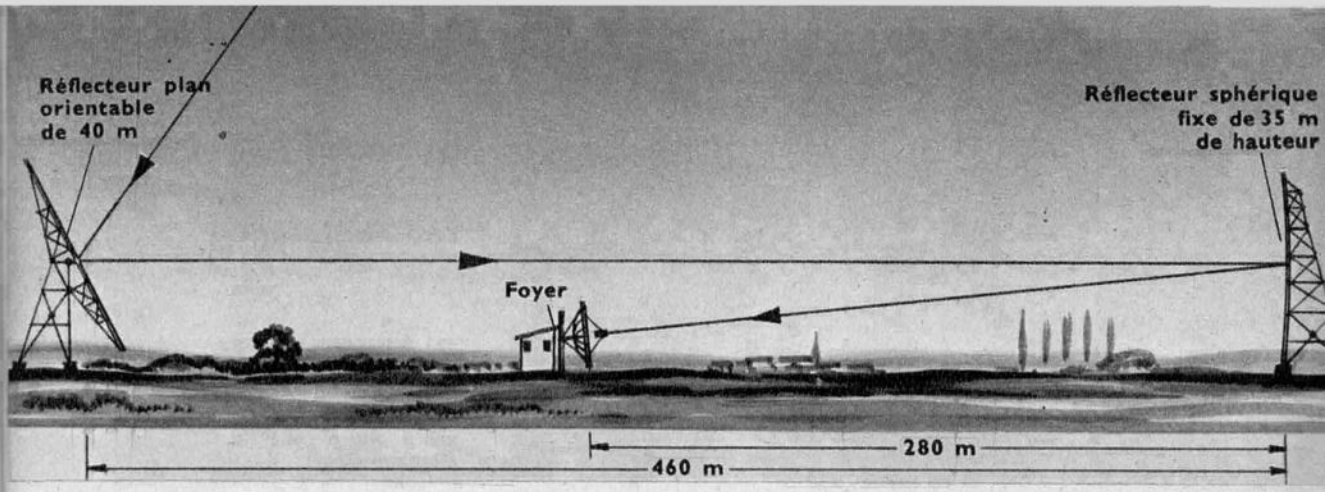


Le réflecteur plan basculant, formé d'éléments de 20 m de long et 40 m de haut.

délimitées dans le ciel par les branches est-ouest et nord-sud de ce dispositif qui constitue une « croix de Mills », du nom de l'astronome australien qui l'a inventé.

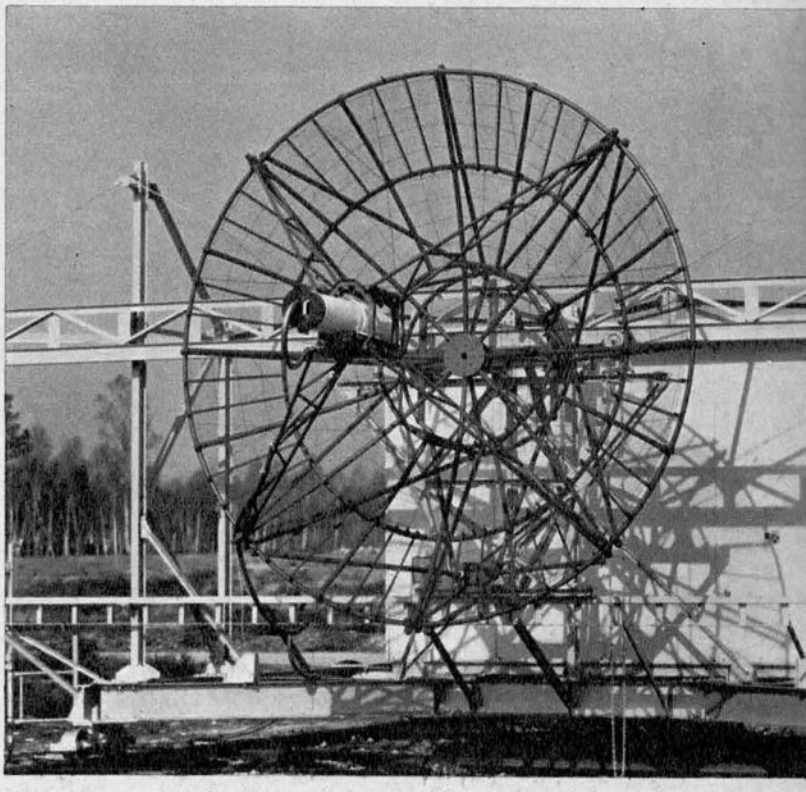
Pour explorer la voûte céleste, il est essentiel de pouvoir déplacer la zone de sensibilité de l'instrument. Quand ce dernier est long de 1 500 m comme à Nançay, on ne peut pas envisager de le déplacer physiquement. On a recours alors à des méthodes électriques, illustrées sur la figure page 46, en retardant les tensions induites par une même onde incidente dans les différents éléments du réseau avant de les additionner à l'entrée du récepteur. On peut même réaliser simultanément différents groupes de connections qui permettent de pointer l'antenne en même temps dans différentes directions, ce qui serait impossible avec un miroir unique. De tels dispositifs permettent d'étudier différentes régions du ciel au même moment. Ceci est essentiel car, à mesure que la zone de sensibilité devient plus étroite, que le pouvoir séparateur augmente et que l'on distingue des détails de plus en plus fins, il faut un temps d'observation croissant pour explorer tout le ciel observable.

Mais là ne se bornent pas les ambitions des



Le radio-télescope de Nançay

L'antenne est formée de deux surfaces réfléchissantes pour les ondes radio. L'une, au nord, est plane et peut tourner autour d'un axe horizontal. Elle envoie les rayons provenant de la source étudiée sur une autre antenne fixe, au sud, de forme générale sphérique. Celle-ci fait converger les rayons en un foyer situé au voisinage du sol. Ils sont reçus par une petite antenne parabolique qui collecte ainsi toute l'énergie reçue par la première antenne et l'envoie sur le récepteur final. Le réflecteur plan définitif doit avoir 200 m de long, ce qui portera la surface utile à 7 000 m²; le réflecteur sphérique atteindra 300 m de long. Le système est prévu, en principe, pour une longueur d'onde de 21 cm, mais il sera possible de descendre jusqu'à 8 cm. Les observations sont faites dans le méridien du lieu et, par déplacement du système focal, dans une bande pouvant s'étendre à quelques degrés de part et d'autre de ce méridien.



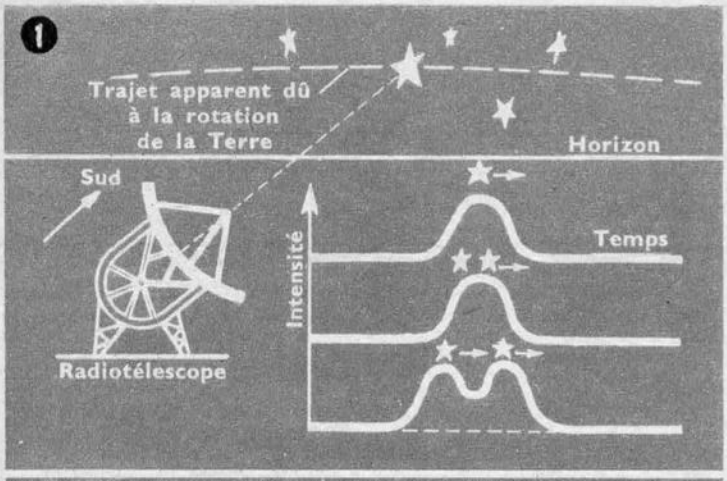
L'antenne parabolique avec, au foyer, le récepteur.

radioastronomes. Cette solution nécessite des réseaux quasi continus d'antennes coûteuses, qu'ils estiment mal utilisées, et où le nombre de connections est si grand que le pointage électrique en devient trop difficile. Quand on arrive à ce degré de complexité, on regrette les miroirs paraboliques dont le pointage se fait par simple orientation.

Les antennes de synthèse

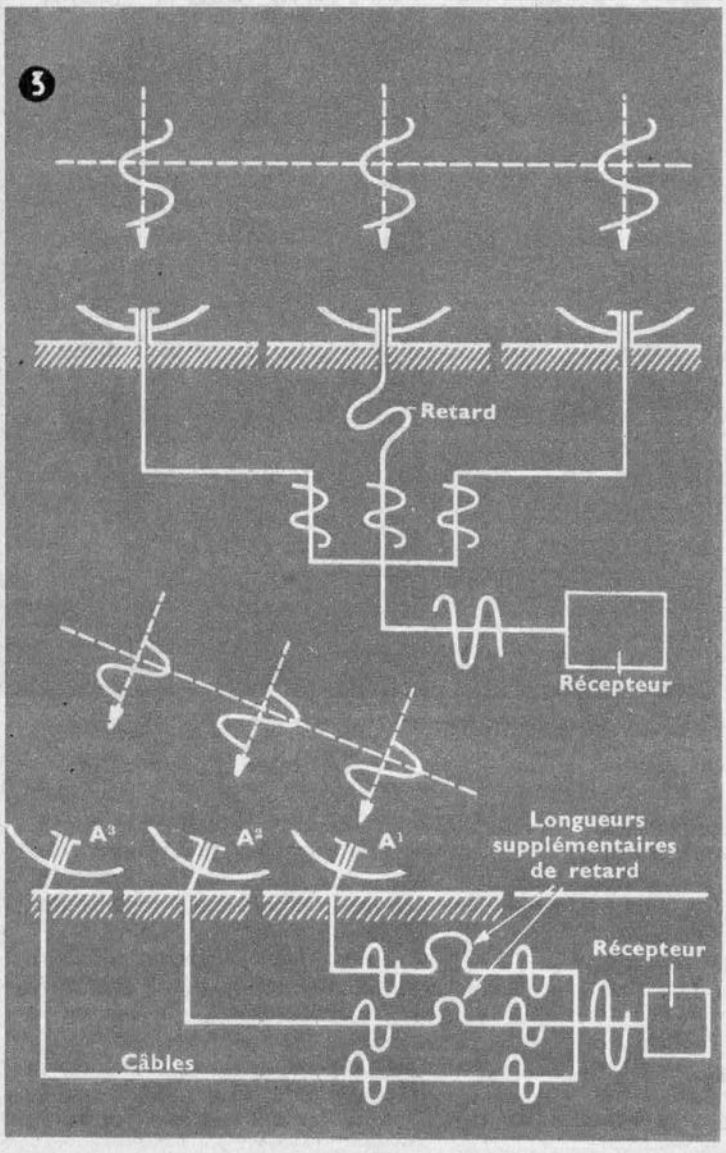
Ces techniques ont été récemment perfectionnées au point qu'il est possible de réaliser une véritable synthèse d'un grand miroir à partir de deux antennes mobiles sur le sol. Pour comprendre comment fonctionnent ces dispositifs, il faut regarder de plus près comment un miroir parabolique concentre les signaux près de son foyer.

Dans une parabole, les différents faisceaux réfléchis par les différentes parties de la surface sont renvoyés vers le foyer, du fait de la forme géométrique de cette surface. A un instant donné, on reçoit avec l'antenne la somme des champs réfléchis vers elle par toutes les parties du miroir. Cette addition ne se fait avec la phase convenable que si l'on vise dans la direction de l'axe du paraboloïde. Si



1 La notion de pouvoir séparateur pour un radiotélescope

Le radiotélescope demeurant fixe, braqué par exemple vers le sud, il enregistre au passage les émissions des différentes étoiles qui défilent dans son champ dans leur mouvement diurne dû à la rotation de la Terre. Les courbes 1 et 2 ont la même allure générale, mais correspondent, la première à une étoile, la seconde à deux étoiles trop proches angulairement pour être séparées. En 3, la distance angulaire entre les deux étoiles étant supérieure au pouvoir séparateur, on distingue nettement la présence de deux objets céleste distincts.

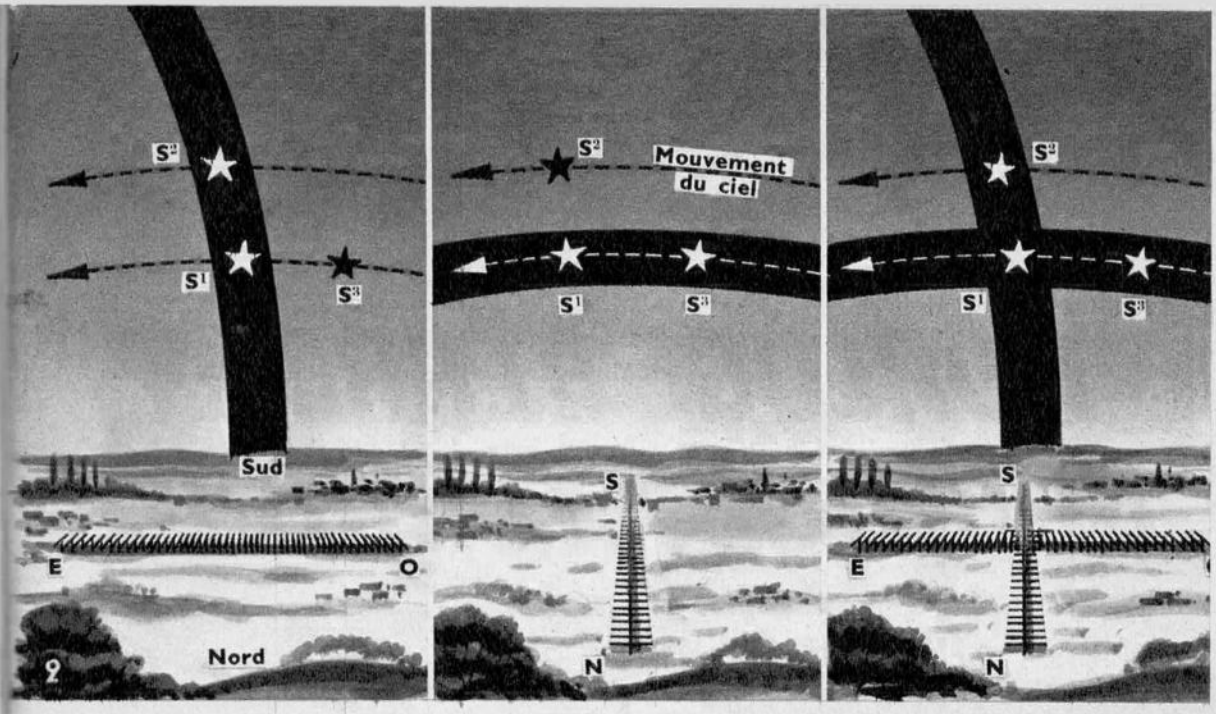


2 La directivité des aériens avec réseaux de dipôles

Une antenne de grande longueur orientée est-ouest (à gauche) ne peut étudier qu'une étroite bande verticale du ciel : la source S3 n'est pas reçue et on ne peut distinguer entre S1 et S2. Une antenne nord-sud (au centre) n'enregistre que dans une bande horizontale, que des méthodes électriques pourront déplacer en hauteur. Pour localiser une source, on utilisera un aérien en croix, un dispositif électronique éliminant les objets qui ne sont pas situés dans la partie commune aux deux bandes délimitées dans le ciel.

3 Principe des méthodes électriques de pointage

Lorsque les antennes d'un réseau sont connectées à un même récepteur par des lignes de longueurs égales, l'ensemble n'est sensible qu'aux ondes arrivant en même temps sur toutes ces antennes car les tensions induites dans chacune d'elles sont alors en phase et s'additionnent intégralement. Une onde oblique atteint A1, A2 et A3 successivement, et il faut retarder le signal délivré par A1 et A2 par des longueurs de lignes supplémentaires pour que les trois signaux soient à nouveau en phase en arrivant à l'entrée du récepteur.



l'on s'écarte de cette direction, les chemins parcourus par les différents faisceaux ne sont plus égaux, les champs ne s'additionnent plus avec la phase correcte, et l'énergie captée diminue.

Au lieu de réfléchir tous les faisceaux vers le foyer, on peut les capter avec des antennes de petites dimensions, guider l'énergie dans des câbles de longueurs convenables et additionner le tout à l'entrée du récepteur. Si les antennes élémentaires couvrent sur le sol la même surface que celle du miroir à synthétiser, le radiotélescope construit aura les mêmes caractéristiques que le miroir. L'antenne sera plane, et l'on saura la pointer électriquement comme on l'a vu plus haut. Le nombre d'antennes à utiliser sera énorme, aussi n'en construit-on que deux, auxquelles on fait successivement occuper toutes les positions nécessaires. Pour chaque position, on fait des observations pendant quelques jours. Puis on déplace les antennes et l'on recommence. En composant tous les enregistrements (et ceci nécessite une importante calculatrice électronique), on obtient les mêmes informations qu'avec un miroir dont le diamètre serait égal à la plus grande distance donnée aux deux antennes élémentaires. Avec un tel dispositif, on n'obtient pas la sensibilité, d'un grand miroir, mais on peut atteindre un pouvoir séparateur pratiquement illimité. On peut même corriger mathématiquement la sommation des enregistrements individuels pour donner à l'instrument synthétique des caractéristiques qu'il serait impossible d'obtenir d'un vrai miroir.

Le calcul et les dispositifs électroniques (amplificateurs pour compenser les pertes dans les câbles, retardateurs) permettent de dépasser les impossibilités mécaniques.

Les radiotélescopes sont devenus des instruments si perfectionnés qu'ils ne peuvent plus être universels. Chaque type d'observation requiert un appareillage particulier.

Les techniques futures

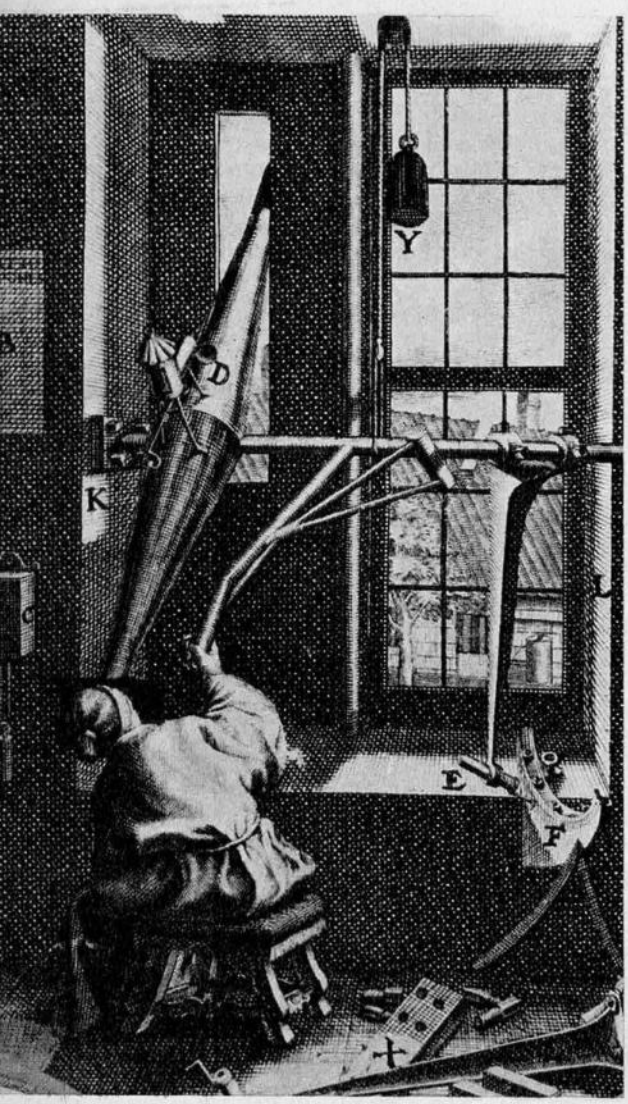
Dans certains cas (ondes centimétriques et millimétriques) les grands miroirs sont irremplaçables. Les futurs paraboloïdes ne seront peut-être pas beaucoup plus grands que ceux qui existent déjà, mais leur précision de forme et de pointage sera améliorée. Pour les ondes plus longues, on utilisera des réseaux formés de paraboloïdes de dimensions plus modestes ou de dipôles. Ces miroirs seront pointés tous ensemble et mécaniquement à partir d'un poste central, les réseaux de dipôles seront pointés électriquement.

Les récepteurs subissent la même évolution. Les signaux reçus ne sont plus seulement amplifiés et enregistrés, on effectue sur eux de véritables calculs. Même l'enregistreur disparaît, faisant place aux techniques digitales (rubans ou cartes perforées), mieux adaptées au traitement électronique des informations.

Dès à présent, les radioastronomes sont certains de porter aux confins de l'Univers visible au moyen des radiotélescopes qu'ils installent sur le sol terrestre. Dans quelques années, des radiotélescopes satellisés nous renseigneront sur les émissions dont l'atmosphère terrestre nous a interdit l'étude jusqu'à présent.

J.-L. Steinberg
Astronome-adjoint à l'observatoire de Meudon

HORLOGE TERRE ET HORLOGE ATOMIQUE



← Une lunette méridienne vers 1690

Ce curieux instrument a déjà les caractères essentiels de la lunette méridienne moderne. Ici, elle est assujettie à tourner autour d'un axe de grande longueur, ce qui assure une précision meilleure que celle du limbe du quart de cercle. Le contrepoids marqué Y soulage l'axe d'une partie du poids de l'instrument.

LE rayonnement est le seul message que les astres nous envoient. L'analyse spectrale permet de déchiffrer ce message et nous voyons dans cet ouvrage tout le parti que les astrophysiciens ont su en tirer. Cependant, à l'œil nu, peu de choses distinguent les étoiles les unes des autres : des différences d'éclat et de subtiles nuances dans la couleur. Pour se développer, l'astrophysique a eu besoin des puissants moyens qu'offre la technique la plus moderne. C'est une science jeune.

Au contraire, la direction d'où émane ce rayonnement a de tous temps frappé et intéressé les hommes. On voit les étoiles former des constellations presque invariables, tandis que les planètes, la Lune, le Soleil, astres errants, ont des positions relatives toujours renouvelées où certains croient voir la marque de nos destins.

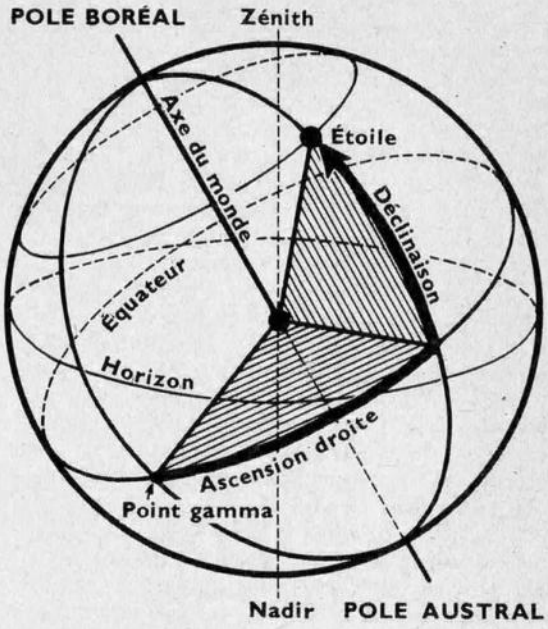
C'est bien l'astrologie qui a attiré l'attention sur les astres et poussé le développement des moyens d'observation et de prédiction. Les marins ensuite eurent besoin de position d'astres précises. A notre époque enfin, le besoin de bonnes positions d'étoiles est plus grand que jamais

A un instant donné, les étoiles forment sur le ciel un *système de référence*, un canevas, auquel on sait rapporter avec précision la position d'un point mobile. Ce point mobile peut être le centre d'une planète, un satellite arti-

ficiel; il peut aussi être fictif comme le zénith, point où la verticale d'un lieu perce la sphère céleste. Le mouvement du zénith parmi les étoiles nous renseigne sur la rotation de la Terre et, par conséquent, fournit l'heure en temps dit « Universel ». On verra d'autre part que cette rotation est irrégulière, et les géophysiciens s'intéressent au plus haut point aux causes de ces irrégularités qui peuvent fournir des informations sur ce qui se passe à l'intérieur de la Terre et dans son environnement.

On sait aussi que les étoiles ont des *mouvements propres* qui déforment peu à peu les constellations. On déduit ces mouvements propres de mesures de positions éloignées dans le temps. On verra dans d'autres chapitres de cet ouvrage tout ce que l'on peut faire de ces mouvements propres; loin d'être satisfaits de ceux que les catalogues d'étoiles peuvent leur fournir, les astrophysiciens en demandent toujours des valeurs plus précises et plus nombreuses.

L'astronomie de position a été éclipsée par les éclatants succès de l'astrophysique et quelque peu boudée par les jeunes astronomes parce que ses travaux sont longs et obscurs. Elle connaît de nos jours un regain d'intérêt, et l'on a fait récemment d'énormes progrès dans la formation des catalogues d'étoiles et l'étude de la rotation terrestre. Nous allons en parler.



LES COORDONNÉES ÉQUATORIALES, les plus utilisées dans l'astronomie de position, sont l'ascension droite, mesurée à partir du point gamma de l'écliptique, et la déclinaison, angle que fait le rayon vecteur de l'étoile avec le plan de l'équateur céleste.

Le système d'étoiles fondamentales

Les astronomes ont choisi un certain nombre d'étoiles (il y en a 1 535) auxquelles ils ont assigné le rôle « d'étoiles fondamentales ». Ce sont des étoiles brillantes (magnitudes généralement inférieures à 6), régulièrement réparties sur tout le ciel. Certes, on a besoin des positions d'un bien plus grand nombre d'étoiles, étoiles faibles ou d'un type particulier, et on a besoin aussi des positions des galaxies lointaines. Toutes ces coordonnées s'obtiennent en plaçant les astres à étudier parmi les étoiles fondamentales, soit par des observations visuelles « relatives », soit en formant leurs images et celles d'étoiles de repère, fondamentales, sur la même plaque photographique. Les erreurs sur les positions et les mouvements propres des étoiles fondamentales se reportent donc sur toutes les autres mesurés et l'amélioration du système fondamental est un problème capital.

Les deux coordonnées d'une étoile s'obtiennent avec la *lunette méridienne* : lorsque l'étoile passe dans le méridien, son ascension droite est égale au temps sidéral local; sa déclinaison est liée simplement à la hauteur mesurée au-dessus de l'horizon, par l'intermédiaire de la latitude. Temps sidéral et latitude s'obtiennent par des observations du Soleil qui peuvent se faire avec le même instrument.

Les lunettes méridiennes en service ont presque toutes été construites à la fin du siècle dernier et frappent par leur aspect vieillot. Ce sont cependant des instruments modernes car ils ont bénéficié des progrès de la technique. On leur a adapté des micromètres impersonnels, des systèmes photographiques ou photoélectriques de lecture des cercles gradués, des perforatrices donnant directement sur cartes perforées les données d'observations et même des systèmes photoélectriques permettant d'enregistrer directement les instants de passage, sans intervention d'un observateur. Le grand âge de leur structure principale, loin d'être un inconvénient, est une garantie de stabilité.

Mais l'instrument méridien classique atteint la limite de ses possibilités et l'on essaye d'autres principes où, généralement, la lunette pivotante est remplacée par une lunette fixe associée à un miroir pivotant, l'observation se faisant toujours dans le méridien.

Enfin, on a pu obtenir à l'Observatoire de Paris des positions d'étoiles par une méthode de principe tout différent : *la méthode des hau-*

teurs égales. On observe, cette fois, les deux passages de la même étoile, à l'est et à l'ouest du méridien, à une hauteur constante au-dessus de l'horizon. Le calcul est assez complexe, mais associée à un instrument de qualité comme l'astrolabe impersonnel de Danjon (directeur de l'Observatoire de Paris), cette méthode donne une précision environ dix fois meilleure que celle de la lunette méridienne classique, à nombre d'observations égal.

Toutes les observations d'étoiles fondamentales sont discutées pour former un *catalogue fondamental*. Le FK 3 (Dritter Fundamental Katalog, par Kopf) a été en usage jusqu'à la fin de 1961. Il vient d'être remplacé par le FK 4. Les positions du FK 3 étaient, en effet, devenues mauvaises par suite des erreurs sur les mouvements propres. Les écarts des ascensions droites du FK 3 par rapport aux résultats obtenus à Paris avec l'astrolabe ne sont pas seulement répartis au hasard, mais révèlent en outre des *erreurs systématiques* dont l'influence est très néfaste, car les moyennes ne les éliminent pas. A ces erreurs correspondent, dans la mesure de l'heure, par exemple, des erreurs de quelques centièmes de seconde, ce qui est beaucoup trop, car on cherche à assurer la précision du millième de seconde.

Le FK 4 améliore beaucoup la situation, mais comme le FK 3, il se détériorera peu à peu à cause des erreurs sur les mouvements propres, qui donnent des erreurs en position croissant avec le temps. Il faut donc continuer à observer sans cesse.

La rotation de la Terre

La rotation de la Terre, rapportée à des repères liés à la Terre elle-même, est complètement caractérisée par la position de l'axe de rotation et par la vitesse angulaire. Ces caractéristiques se déduisent de l'observation de la trajectoire des zéniths des observatoires parmi les étoiles fondamentales. En ce qui concerne l'heure, par exemple, on peut assimiler la sphère étoilée au cadran et un zénith à l'aiguille d'une horloge.

Les appareils spécialisés dans cette étude ont en commun un système optique définissant le zénith : c'est un bain de mercure, dont la surface libre constitue un miroir horizontal. La perpendiculaire à cette surface, qui perce la sphère céleste au zénith, est définie optiquement. Certains de ces instruments placent le zénith par rapport à des étoiles très proches, de sorte que zénith et étoiles sont simultanément dans le champ, la lunette étant alors fixe et verticale : ce sont les lunettes zénithales. D'autres placent le zénith par rapport à des étoiles éloignées du zénith : les astrolabes. L'astrolabe de Danjon, par exemple, observe à 30° de distance zénithale. Les considérations théoriques et la commodité d'emploi peuvent faire préférer l'un ou l'autre type d'instrument, dont la précision est du même ordre. L'astrolabe, on l'a vu, permet du même coup d'améliorer le catalogue fondamental, ce dont la lunette zénithale est incapable, car ses observations ne portent que sur une étroite zone de déclinaison.

Après une nuit d'observation avec l'un ou l'autre de ces appareils, on peut placer le zénith à un instant donné avec une erreur probable inférieure à 0″, 04. On peut se représenter cette précision en imaginant qu'on

← L'astrolabe impersonnel A. Danjon

On voit ici le bain de mercure et le prisme qui donnent la distance zénithale des astres. L'instrument, un des plus précis qui soient, est de conception et réalisation purement françaises et il en existe plus de trente répartis dans les observatoires du monde entier.

se serve de ces instruments pour faire le point, comme un marin de son sextant; on pourrait tracer sur une carte un cercle correspondant à 1,2 m de rayon dans lequel on aurait une chance sur deux de se trouver !

Le mouvement du pôle

L'analyse des observations montre que la ligne des pôles n'est pas rigidement liée à la Terre, à la façon de l'axe d'une mappemonde, mais qu'elle « joue » légèrement. Par suite, le pôle de rotation décrit une courbe compliquée dont l'amplitude totale n'a pas dépassé 30 m depuis qu'on a commencé à la tracer, à la fin du siècle dernier. Dans cette « polhodie », on a pu isoler une boucle annuelle et une autre de période 14 mois dont la théorie justifie l'existence. Il reste néanmoins d'autres termes et, en particulier, une dérive du pôle (le pôle nord se dirigerait vers l'Amérique du Nord à la vitesse de 8 cm par an) dont la réalité est controversée. Ces mouvements dépendent étroitement de la constitution physique de la Terre et leur étude doit permettre de résoudre maints problèmes de géophysique.

Mais, indépendamment de toute théorie, les astronomes eux-mêmes ont besoin de connaître le mouvement du pôle pour réduire leurs propres observations. C'est le cas, entre autres, des mesures de l'heure d'après la rotation de la Terre, qu'il faut, avant tout, débarrasser des termes polaires.

L'importance de ces problèmes est telle qu'elle a conduit à la création d'un Service International du Mouvement Polaire (ancien Service des Latitudes), qui fonctionne depuis 1900 et dispose de plusieurs stations d'observations le long du 39^{me} parallèle Nord. Ce service est en profonde réorganisation, car ses promoteurs n'avaient pas compté sur l'extraordinaire complexité du mouvement des pôles et, là encore, il faut augmenter le nombre et la qualité des mesures.

La rotation de la Terre et le Temps Universel

L'échelle de temps qui règle notre vie est celle du *Temps Universel* (TU). Elle est basée sur la rotation de la Terre. C'est donc l'horloge Terre, qui règle nos horloges mécaniques. Mais les progrès de la technique sont tels que les horloges artificielles ont maintenant une stabilité plus grande que la rotation de la Terre.

A la suite des expériences des physiciens anglais Essen et Parry (1955), divers types d'horloges atomiques ont été construits. Les plus récentes de ces horloges permettent de mesurer un intervalle de temps, si long soit-il, avec une erreur relative inférieure à 10^{-11} (un cent-milliardième), soit, par exemple, un an avec une erreur inférieure à 0,3 millième de seconde.

La rotation de la Terre est plus de mille fois plus irrégulière. Elle présente d'abord une inégalité saisonnière due à des causes météorologiques, de sorte que la Terre avance ou retarde périodiquement de plus de 30 millièmes de seconde. Ensuite, elle présente des fluctuations imprévisibles qui la « dérèglent » peu à peu de plusieurs dizaines de secondes, où l'on reconnaît, dans l'ensemble, un ralentissement progressif dû au frottement exercé par les marées.

Ce ralentissement est tel que la durée du jour augmente de 1,6 millième de seconde par siècle. C'est peu, mais le cumul finit par être important : une horloge parfaitement réglée au début de l'ère chrétienne serait de nos jours en avance de 3 heures environ.

Si l'on appelle TA le temps défini par les horloges atomiques, temps qu'on assimile à un temps uniforme, la différence TA-TU représente les inégalités de la rotation terrestre.

Lorsqu'on dépouille ces résultats bruts du terme polaire et de l'inégalité saisonnière dont il a été question précédemment, on obtient les fluctuations de vitesse de rotation.

A. Danjon a, le premier, mis ainsi en évidence l'accident survenu dans la rotation terrestre en juillet 1959. Vers le 20 de ce mois, la durée du jour a brusquement augmenté de 0,8 millième de seconde, puis elle est revenue peu à peu à sa valeur normale.

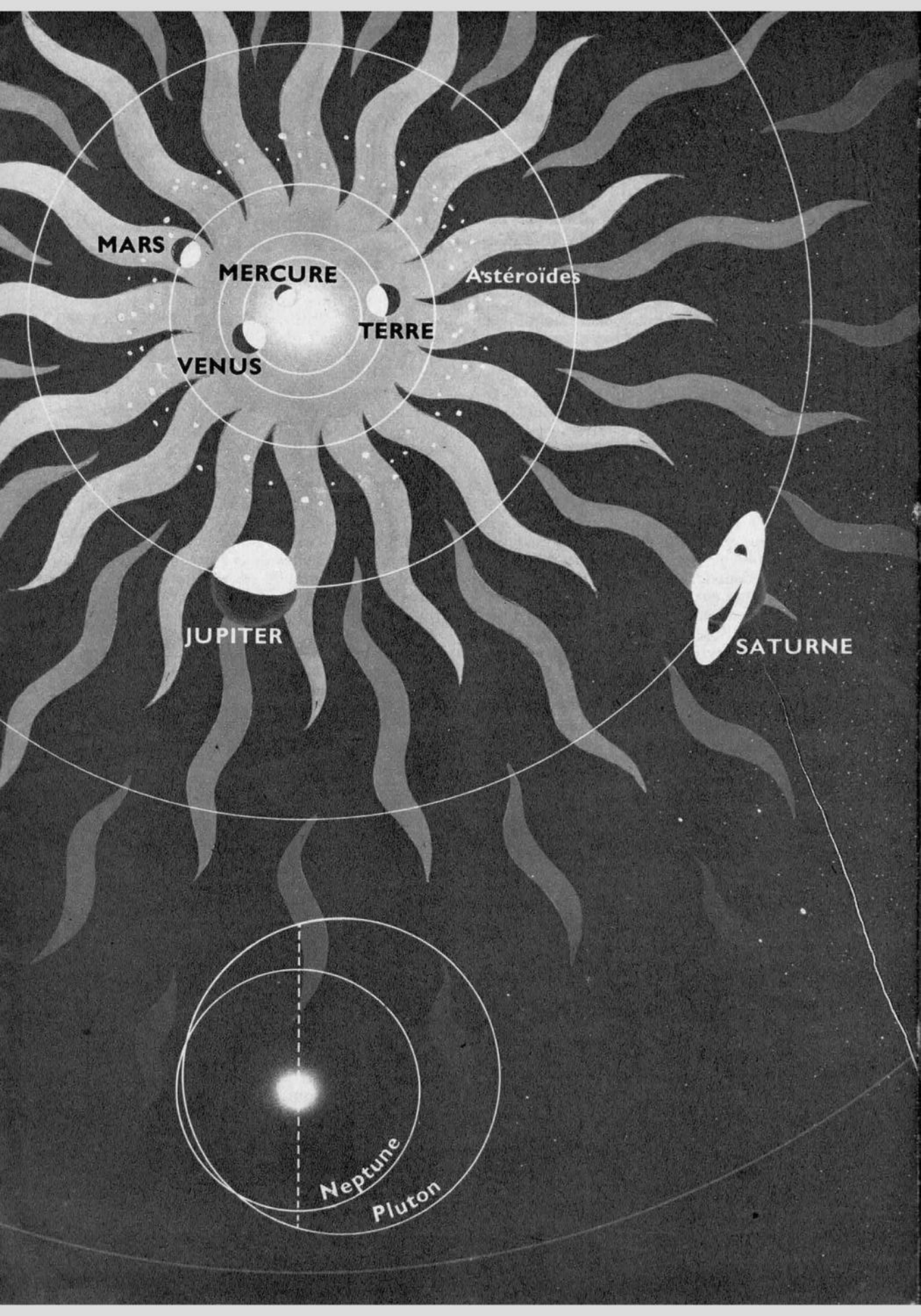
Peu après les astronomes ont eu connaissance de l'extraordinaire série d'éruptions solaires qui ont eu lieu à la même époque. Les recherches ultérieures de Danjon ont montré une excellente corrélation entre les fluctuations de la vitesse de rotation de la Terre et la composante nucléonique du rayonnement cosmique.

L'observation d'un tel phénomène est de nature à provoquer des recherches fécondes et à contrôler les hypothèses émises au sujet de l'environnement de la Terre et des échanges d'énergie de cet environnement avec la Terre elle-même.

Ainsi, dans ce court exposé, on a pu voir les imbrications de l'astronomie de position avec la physique (horloges), la géophysique, l'astrophysique.

C'est assez montrer le rôle actif qu'elle joue dans la science moderne : elle mérite bien toujours le nom d'astronomie fondamentale qu'on lui donne souvent.

Bernard GUINOT
Astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris.

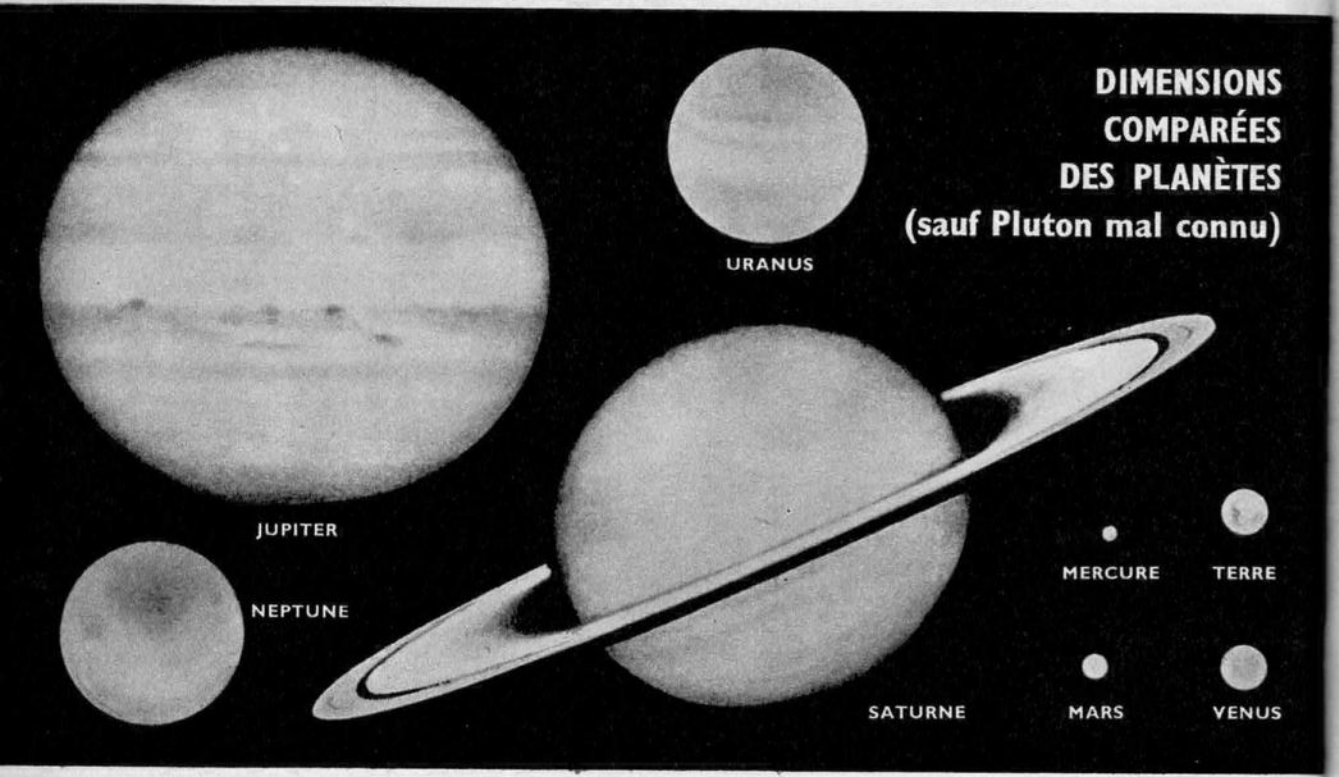

MARS
MERCURE
Astéroïdes
TERRE
VENUS
JUPITER
SATURNE
Neptune
Pluton

LA LUNE ET LES PLANÈTES

LA lunette astronomique a montré dès son invention que les planètes, à l'inverse des étoiles, présentent un diamètre apparent sensible. Nous savons maintenant que ces astres, relativement proches, tournent autour du Soleil et ne sont pas lumineux par eux-mêmes: la lumière qu'ils nous envoient n'est autre que la lumière solaire diffusée. Les Grecs connaissaient cinq planètes: Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne, que nous citons ici dans l'ordre des distances croissantes du Soleil. La Terre elle-même est une planète située entre Vénus et Mars. Au delà de Saturne, Uranus fut découvert par Herschel en 1781, et Neptune mis en évidence par Le Verrier en 1846 grâce aux perturbations qu'il apporte au mouvement d'Uranus. Enfin, Pluton fut découvert en 1930 à l'observatoire Lowell.

Les planètes que nous venons de nommer sont dites *planètes principales*. Certaines d'entre elles (la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) sont accompagnées d'un ou de plusieurs satellites tournant à faible distance autour d'elles, à la façon dont les planètes tournent elles-mêmes autour du Soleil. La Terre est accompagnée d'un satellite unique : la Lune...

Le système solaire et les planètes qui le composent. Pour Pluton, on a seulement tracé son orbite par rapport à celle décrite par Neptune; leurs plans se coupent suivant la ligne pointillée et font entre eux un angle de 17°.



Il existe aussi plusieurs milliers de petites planètes, peu brillantes et reconnaissables seulement sur les clichés photographiques grâce à leur mouvement apparent par rapport aux étoiles. Elles apparaissent le plus souvent ponctuelles dans les plus grandes lunettes, et l'on n'a pu mesurer le diamètre que des plus grosses d'entre elles, comme Cérès (770 km). Généralement, ce diamètre n'excède pas quelques kilomètres : il s'agit alors de cailloux plutôt que de corps sphériques.

Les planètes (avec leurs satellites) ne sont pas les seuls objets qui gravitent autour du Soleil : citons les comètes, les météorites (qui apparaissent sous forme d'étoiles filantes ou parfois de bolides, lorsqu'elles pénètrent à grande vitesse dans notre atmosphère), la fine poussière de la lumière zodiacale enfin.

Tous ces objets constituent le *système solaire ;* ils forment, pourrait-on dire, bloc avec le Soleil : alors que la lumière du Soleil ne met que 8 minutes pour parvenir à la Terre (à raison de 300 000 km/s) et 6 heures pour aller jusqu'à Pluton, il lui faut 4 ans pour parcourir la distance qui nous sépare de l'étoile la plus proche. Malgré le « vide » interplanétaire, malgré les millions de kilomètres qui séparent les planètes entre elles, le système solaire est isolé dans l'espace, et cet isolement témoigne de son unité profonde.

Nous nous limiterons, faute de place, à la description de la Lune et des planètes principales. Les figures page 52 et ci-dessus montrent le plan général du système solaire et les dimensions relatives des planètes principales. Nous savons que le Soleil tourne sur lui-même; or, toutes les planètes principales tournent autour du Soleil sur leur orbite dans le même sens que l'astre central. Ces orbites (elliptiques) sont en général proches du cercle et leur plan est voisin de celui de l'équateur solaire. D'autre part, toutes les planètes tournent sur elles-mêmes, mais leur équateur est souvent incliné sur le plan de l'orbite. Enfin, les principaux satellites des planètes tournent dans un plan généralement voisin du plan de l'équateur planétaire.

On remarquera que les quatre planètes principales les plus proches du Soleil (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) sont de petites dimensions. Leur densité est élevée, elles sont constituées de roches (comme la Terre). Ce sont les *planètes telluriques*. Au contraire, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune sont des astres énormes comparativement à la Terre et leur densité est faible; ce sont les *grosses planètes*. Ces différences tiennent essentiellement à la composition chimique de ces astres et à

leur structure interne; elles ont une même origine cosmogonique. Les planètes se sont très vraisemblablement formées par condensation de gaz froids et de poussières. Loin du Soleil, la température était assez basse pour que les gaz les plus légers (hydrogène et hélium) se condensent avec les molécules plus lourdes et les poussières, et le processus ne fut certainement pas accompagné d'une grosse élévation de température, sinon l'agitation thermique des molécules aurait entraîné une dissipation rapide des gaz légers : ainsi s'explique la faible densité des grosses planètes. Au voisinage du Soleil, au contraire, la température était suffisante pour que les gaz les plus volatils se soient échappés : seules les molécules lourdes et les poussières se sont condensées.

L'âge des planètes

Il semble acquis également que la Terre et les autres planètes se sont formées autour du Soleil à la même époque. L'âge des minéraux terrestres les plus anciens, mesuré grâce à l'analyse des produits de décomposition radioactive, remonte à quelques milliards d'années. L'étude des météorites — dont certaines résultent probablement de la dislocation d'une ou plusieurs planètes anciennes — conduit à un âge de 4,5 ou 5 milliards d'années. Tel est sans doute l'âge des planètes. Il est certain que la contraction des planètes telluriques fut suivie d'une élévation considérable de température, soudant entre elles les particules des couches externes, ramollissant même l'écorce et portant à l'incandescence le noyau. Selon les uns, cette élévation de température aurait été favorisée par la recombinaison exothermique de certains radicaux libres (initialement stables dans le vide glacé de l'espace interplanétaire); selon d'autres, par la radioactivité des roches. Elle explique le « feu central » et les phénomènes volcaniques de notre globe. Elle est corroborée également par l'analyse cristallographique et chimique des variétés allotropiques des cristaux de fer-nickel contenus dans les météorites ferreuses, due à Urey. Cette analyse indique que le ou les objets célestes planétaires ayant donné naissance aux météorites étaient d'une taille au moins similaire à celle de Cérès ou de la Lune, et que ces objets, formés à froid, furent portés ensuite par l'intérieur à de hautes températures (1 500° C) il y a quelques 4,5 milliards d'années, avant de se briser (sans doute sous l'effet d'un choc mutuel) et de se refroidir. Certains débris se seraient à nouveau agglomérés à froid en un ou plusieurs objets de même taille, ayant subi ensuite un nouveau réchauffement

Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

La comète MRKOS d'août 1957

Les comètes, comme les planètes, appartiennent à notre système solaire. Elles présentent généralement trois parties : le noyau brillant, la chevelure qui l'enveloppe d'une lueur diffuse, la queue, toujours dirigée, non dans la direction opposée au mouvement, mais dans la direction opposée à celle du Soleil (elle est repoussée par la pression de radiation). Les grandes comètes spectaculaires (par exemple celle de Halley) sont rares ; mais il y en a chaque année plusieurs petites observables à la lunette. Leurs orbites, elliptiques (comètes périodiques dont on connaît plus de cent), paraboliques, ou même hyperboliques (comètes qui disparaissent définitivement), ont le Soleil pour foyer. La lumière est due pour la plus grande part à la luminescence d'un gaz excité par le rayonnement solaire. Parfois, sous l'action des attractions opposées du Soleil et des grosses planètes, certaines comètes périodiques se désagrègent et peuvent se trouver à l'origine de pluies d'étoiles filantes.

avant d'être brisés à leur tour. Ces vues cosmogoniques ne sont pas spéculatives, elles ont au contraire une base expérimentale puisqu'elles résultent d'une analyse extrêmement poussée des météorites. La plupart des petites planètes occupent actuellement l'espace compris entre Mars et Jupiter et il n'est pas impossible, selon Olbers, que nous observions là les restes de la dislocation d'une planète plus importante. Quoi qu'il en soit, la planète détruite ne fut sans doute pas unique.

NOTRE SATELLITE : LA LUNE

Grâce à la proximité de la Lune, nous connaissons les détails de sa surface d'une manière infiniment plus précise et détaillée que pour tout autre astre. En outre, le développement des recherches spatiales a poussé depuis quelques années de nombreux astronomes à appliquer à la sélénographie l'arsenal si efficace des méthodes d'investigation dont dispose l'astrophysique : la Lune est devenue un sujet d'étude important pour les astrophysiciens, ce qu'elle n'était pas il y a dix ans seulement. Cependant, de nombreuses questions touchant à la nature du sol lunaire et à la formation de son relief n'ont encore reçu que des réponses partielles. Il faudra attendre, pour en savoir beaucoup plus long, d'être allé sur notre satellite.

La distance moyenne Terre-Lune est de 384 000 km, soit environ 60 rayons terrestres. (En raison de l'excentricité de l'orbite lunaire, cette distance varie entre 356 000 km au « périgée » et 407 000 km à l'« apogée ».) La Lune boucle son orbite en 27 jours 8 heures. Durant cet intervalle, la Terre s'est déplacée autour du Soleil : pour que notre satellite soit vu à nouveau dans la même position par rapport au Soleil, il doit encore parcourir une fraction supplémentaire de tour sur son orbite. La lunaison, c'est-à-dire le cycle complet des phases de la Lune, s'accomplit finalement en 29 jours 13 heures environ.

Le diamètre de la Lune vaut un peu plus du quart de celui de notre globe (soit 3 473 km). Vu de la Terre, le disque lunaire sous-tend en moyenne un demi-degré.

La masse de la Lune est 84 fois plus petite que celle de notre planète. Il en résulte que la densité moyenne du globe lunaire n'est que 3,34 contre 5,2 pour la Terre. Cette différence importante témoigne que la structure interne de la Lune est différente de celle de notre globe. La densité moyenne de notre satellite ne dépasse pas sensiblement celle de la croûte terrestre, laquelle est formée de roches de densité 2,7.

Le relief lunaire au premier quartier

ARCHIMÈDE, au centre, Autolychus et Aristillus, à gauche (cliché ci-contre), sont des cirques bien conservés. Cependant le premier est le plus ancien avec son arène emplie de lave solidifiée comme celle de la plaine qui l'entoure, appelée la « Mer des Pluies ».

COPERNIC est un cirque récent (cliché de gauche des pages suivantes) comme le cirque voisin plus petit. Entre les deux, les vestiges d'un cirque qui a été enseveli dans la lave, avec des chapelets de craterlets dus à l'impact des matériaux projetés lors de la formation de Copernic. Un tel cliché prouve indubitablement l'origine météoritique des cirques.

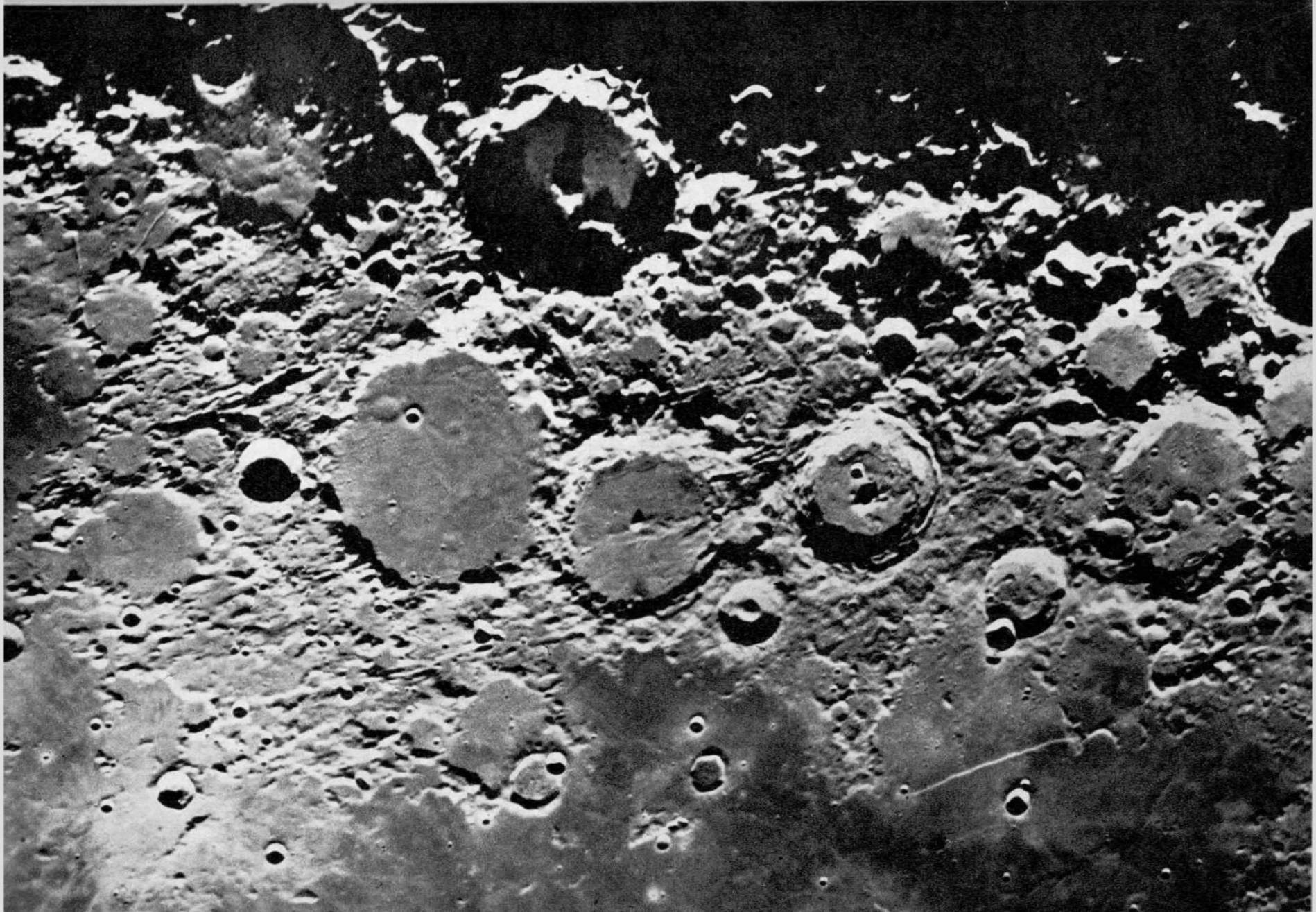
PTOLÉMÉE, Alphonse et Arzachel sont, de bas en haut, au centre du cliché de droite des pages suivantes. A la limite du « terminateur » qui sépare la partie éclairée de celle dans l'obscurité, Hipparque et Albategnius. Alphonse, avec son piton central, est le site où Kozyrev, en 1958, a observé une manifestation de volcanisme, qui serait plutôt une détente subite de gaz fossile demeuré occlus dans le sol lunaire.

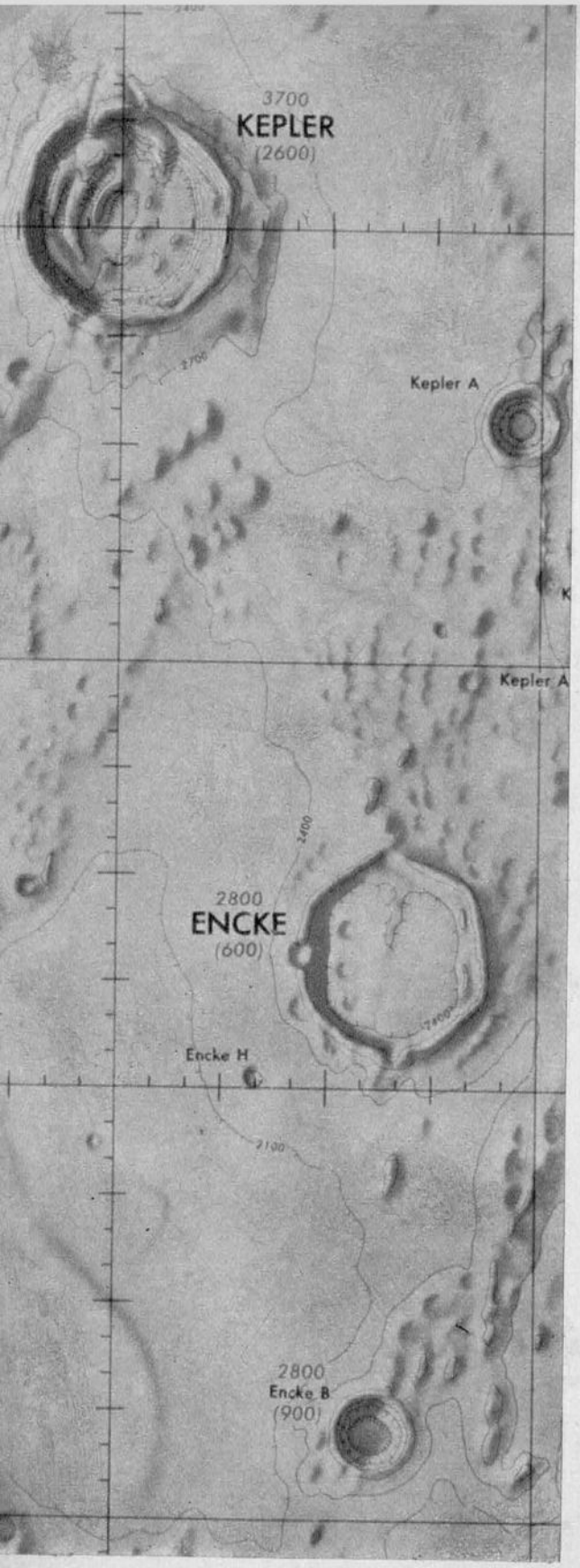
La gravité sur la Lune est 1/6 de la gravité terrestre. Alors que la vitesse de libération terrestre atteint 11 200 m/s, elle n'est que de 2 380 m/s à la surface de la Lune.

La Lune nous présente toujours le même hémisphère, comme le prouve la fixité des détails de sa surface. En fait, par suite de la « libration » (sorte de balancement périodique du globe lunaire), on a pu observer, de la Terre, 60 % de la surface lunaire. Cette immobilité apparente de la face visible de la Lune prouve que notre satellite tourne sur lui-même dans le même temps qu'il parcourt son orbite autour de la Terre.

Il est bien connu que la Lune ne possède pas d'atmosphère, et nous rappellerons brièvement les observations qui établissent ce fait : les détails du sol sont aussi nets sur les bords du disque qu'au centre et les ombres portées par le relief sont noires (absence de lumière diffusée) ; aucun nuage n'a jamais été observé ; une étoile occultée par le bord du disque disparaît brusquement (absence de réfraction) ; enfin, une atmosphère, même extrêmement ténue, serait éclairée par le Soleil et diffuserait la lumière solaire sur le fond noir du ciel au-dessus des cornes du croissant, ce qui a échappé aux observations les plus délicates et a permis à Lyot et Dollfus de fixer à l'atmosphère lunaire une densité inférieure au milliardième de celle de notre propre

Photos Observatoire Lick →





atmosphère (ce qui représenterait moins de 30 milliards de molécules par centimètre cube).

L'absence d'atmosphère lunaire n'est pas pour nous surprendre. Échauffées par le Soleil, les molécules auraient des vitesses d'agitation telles qu'un grand nombre d'entre elles seraient animées d'une vitesse supérieure à 2 380 m/s, et, en quelques millions d'années, la moitié d'une telle atmosphère serait dissipée dans l'espace. Il est probable que la Lune a possédé une atmosphère appréciable dans les tout premiers temps de son existence, mais celle-ci a disparu rapidement en raison de la faible gravité lunaire. Remarquons toutefois qu'une atmosphère résiduelle de gaz lourds, résultant par exemple de la décomposition radioactive des roches, existe peut-être autour de la Lune, mais cette atmosphère constamment renouvelée s'échappe à mesure et sa densité n'excède certainement pas quelques milliards de molécules par centimètre cube (et sans doute même beaucoup moins). Un telle atmosphère est trop peu dense pour être observable.

En l'absence d'atmosphère, et par suite d'eau, il faut s'attendre que la température de la surface lunaire passe par des extrêmes entre le jour et la nuit. Les mesures du rayonnement propre infrarouge de la Lune ont confirmé cette façon de voir : la face éclairée de la Lune est portée à plus de 100° C, tandis que la face obscure est à — 100° C. En quelques heures, le sol lunaire voit sa température s'abaisser de 200° C lorsqu'il cesse d'être éclairé.

Le relief sur la Lune

Le relief de la Lune est bien connu. On l'observe admirablement grâce aux ombres portées au voisinage du « terminateur » (limite de séparation de l'hémisphère obscur et de l'hémisphère éclairé), là où le Soleil éclaire obliquement le sol. De la longueur de ces ombres portées il a été facile de déduire l'altitude du relief. Les plus petits détails photographiés à l'heure actuelle mesurent quelques centaines de mètres de large. Les grandes taches grises visibles à l'œil nu (appelées improprement « mers » ou « océans » par les premiers observateurs) apparaissent au télescope comme de vastes plaines plus ou moins unies

← Une « Lunar Chart »

Cette carte au millionième est plus précise et détaillée que toutes les précédentes. Elle a été spécialement dressée par l'U.S. Air Force à l'intention des astronautes qui atterriront à la surface de la Lune.

ou ridées, à la façon de champs de laves solidifiés. Elles sont parsemées de failles (les « rainures »), de pitons rocheux isolés (comme noyés partiellement dans la lave), enfin d'une multitude de cirques de toutes dimensions. Quant aux régions claires (les « continents »), elles sont extrêmement tourmentées, les cirques y sont plus nombreux, se chevauchent fréquemment les uns les autres. On y observe également des failles. En bordure des « mers », les « continents » montrent généralement de véritables chaînes montagneuses. Les plus hauts sommets dépassent 8 000 m.

Les cirques sont manifestement d'âges inégaux. Certains sont noyés partiellement dans les « mers », d'autres sont démantelés et sur leurs remparts ou dans leur arène se sont formés des cirques plus récents, aux formes abruptes et régulières. Il y a des cirques de toutes dimensions, depuis Clavius (230 km de diamètre) jusqu'aux minuscules craterlets (diamètre 1 km ou moins). Plus de 300 000 ont été catalogués. Les craterlets parsèment indistinctement la surface des « mers » et des « continents », l'arène et les remparts des cirques plus grands. Certains sont groupés en chapelets et parfois même le long des failles.

Mentionnons enfin les petites auréoles claires qui entourent de nombreux craterlets (bien visibles à la pleine Lune, sous un éclairage vertical) et les grandes traînées claires de même nature qui rayonnent autour de quelques grands cirques « récents » (Tycho, Copernic, etc.).

Structure du sol lunaire

Avant d'aborder les questions de l'origine du relief lunaire, il convient de donner des précisions sur les résultats nouvellement acquis concernant la structure physique du sol de notre satellite, qui pourront nous éclairer sur la formation du relief. Ce problème a un intérêt non seulement astronomique mais technique (puisque l'on posera d'ici peu des engins sur la Lune), et de très gros moyens ont été mis en œuvre pour le résoudre au cours des dernières années. Les procédés utilisés font appel aux propriétés photométriques et polarimétriques du sol, à la détermination de la variation de température du sol au moment des éclipses, à la réflexion des ondes radar.

Les Soviétiques Barabashev et Charonov, le Hollandais Van Diggelen, ont ainsi montré, par l'étude de la variation d'éclat du sol lunaire avec l'angle d'incidence des rayons solaires, que la structure superficielle de ce sol est la même en toutes les régions. L'éclat décroît extrêmement vite dès que l'angle d'incidence s'éloigne de la normale, et ceci ne peut s'expliquer qu'en supposant la surface lunaire rugueuse, perforée de multiples cavités profondes et contiguës, à la façon des scories artificielles. Le fond de ces cavités cesse d'être éclairé dès que le Soleil ne les illumine pas de face. Il s'agit là d'une structure à l'échelle du millimètre.

Les mesures polarimétriques de Lyot et Dollfus permettent d'accéder à une échelle nettement plus petite. Par comparaison avec différentes substances terrestres, le sol lunaire polarise la lumière comme le ferait une substance poudreuse constituée de matière finement divisée en petits grains absorbants plus ou moins analogues aux cendres volcaniques. Il est facile de concilier ce résultat avec l'aspect criblé de cavités beaucoup plus grandes donné par les mesures photométriques, si l'on imagine la surface des scories saupoudrée de cendres.

Quelle peut être l'origine d'une telle structure? Le calcul indique que les alternatives de chaud et de froid n'ont guère pu, en quelques milliards d'années, effriter ainsi la surface lunaire. Il faut sans doute faire appel aux impacts des innombrables petites météorites qui n'ont cessé de frapper la Lune depuis qu'elle s'est figée dans son état actuel. Non seulement le sol est creusé à l'endroit de l'impact, mais la formation de ces cavités est accompagnée de projection de poussière. Du reste, une astronome soviétique, Mme Sytinskaya, a montré que la couleur et le pouvoir réflecteur du sol lunaire ne sont ceux d'aucune substance minérale terrestre. Il faut sans doute admettre que l'échauffement produit par les impacts des petites météorites a été suffisant pour transformer chimiquement la roche. Il est probable d'autre part que le bombardement du sol lunaire par les atomes et les particules éjectés par le Soleil a produit une adhérence des grains de poussière. Ceci nous amène à nous demander quelle est l'épaisseur de la couche poudreuse.

L'astrophysicien américain Sinton a mesuré avec une grande précision la variation de température des différentes régions de la Lune au moment des éclipses de notre satellite, lorsqu'il cesse brusquement d'être éclairé par le Soleil. En lumière infrarouge, cette variation est brutale : le sol lunaire apparaît peu conducteur de la chaleur et seules des substances finement pulvérisées peuvent conduire à ce résultat. D'après l'allure du refroidissement, il faudrait admettre en outre que la couche de poussières atteint au plus quelques millimètres. Quant au socle sur lequel est déposée cette poudre, on le connaît mal. Sinton a mesuré le rayonnement propre de la Lune sur 1 mm de longueur d'onde et a pu montrer

que la variation de température au moment des éclipses est beaucoup moins accusée que dans l'infrarouge : le sol lunaire apparaît partiellement transparent pour les longueurs d'onde millimétriques, de sorte que la température mesurée est celle qui règne dans le sol à une certaine profondeur. Sur 1 cm de longueur d'onde enfin (domaine de la radio-astronomie), les variations thermiques sont très atténuées et le rayonnement provient d'une couche située à une profondeur supérieure au millimètre, c'est-à-dire du socle lui-même. En travaillant sur une gamme étendue d'ondes radio, on pourra sans doute obtenir des valeurs de la transparence du sol lunaire pour les différentes radiations et en déduire des indications sur la composition chimique du socle.

Signalons enfin l'emploi des ondes radar réfléchies par le sol lunaire. La réflexion apparaît quasi spéculaire, c'est surtout le centre du disque (assimilable à un miroir plan perpendiculaire à l'axe Terre-Lune) qui contribue au rayonnement renvoyé vers notre planète. L'interprétation de ce fait est difficile et n'a pas encore été menée à son terme.

Retenons seulement, pour nous résumer, les données pratiques suivantes : 1° les engins qui se poseront sur la Lune ne risqueront probablement pas de s'enfoncer dans une couche épaisse de poussière; 2° il suffira de creuser dans le sol lunaire des abris peu profonds pour se trouver complètement isolé des variations considérables de température entre le jour et la nuit.

L'origine des cirques

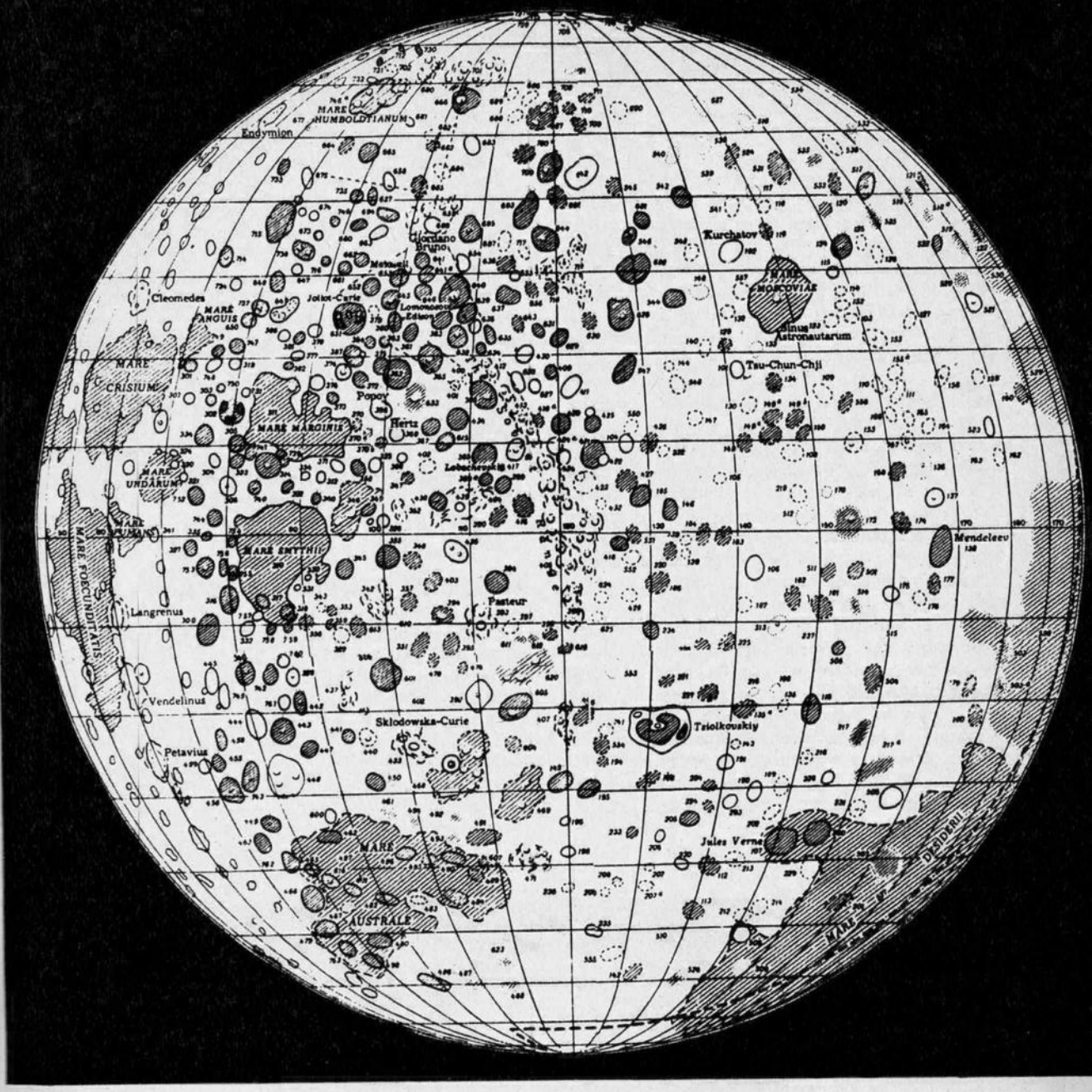
Deux théories se sont affrontées pour expliquer l'origine du relief lunaire, et en particulier des cirques : la théorie de l'origine interne et la théorie météoritique. Selon la première, les « mers » seraient dues à des épanchements de magmas en provenance de l'intérieur, ainsi que les remparts des cirques. Selon la seconde, les cirques et même les « mers » auraient été formés par l'impact de grosses météorites. A 20 km/s, une météorite arrivant sur la Lune ne serait freinée par aucune atmosphère et serait volatilisée en percutant le sol; les matériaux de la surface seraient chassés et formeraient le rempart du cirque. De très grosses météorites, plus lentes, auraient fondu le sol et créé les épanchements de la lave des « mers ».

La théorie météoritique est généralement admise de nos jours, mais elle n'explique pas tout. Il est de fait que l'origine volcanique des grands cirques est insoutenable : les cônes volcaniques terrestres sont formés de matière interne expulsée, ils sont plus volumineux que le cratère central, tandis que, sur la Lune, les cirques présentent l'aspect de dépressions entourées de remparts dont le volume est du même ordre que celui de la cavité — tout au moins dans le cas des cirques bien conservés — ce qui favorise l'hypothèse météoritique. On observe d'ailleurs sur Terre quelques cirques météoritiques dont la ressemblance avec les craterlets lunaires est frappante. D'autre part, nous avons vu que beaucoup de cirques empiètent les uns sur les autres, les remparts du cirque « ancien » étant complètement soufflés à l'emplacement occupé par le cirque plus « jeune ». Les apparences seraient différentes si les cirques étaient d'origine volcanique. Enfin, certains grands cirques sont entourés de chapelets de craterlets, comme si l'explosion qui a créé le cirque avait projeté à grande vitesse un grand nombre de fragments qui, en retombant, auraient produit les craterlets.

L'origine des « mers »

Cependant de nombreux spécialistes, comme Kuiper, ne pensent pas que la théorie météoritique puisse expliquer tous les détails du relief lunaire et en particulier les « mers ». Il apparaît plutôt que c'est de l'intérieur de la Lune que la matière en fusion des « mers » a jailli, sans doute aux endroits de moindre résistance du sol, peut-être liés du reste à certains impacts. L'exemple de cirques comme Archimède et Platon en témoigne, dont le fond est partiellement comblé d'une matière analogue à celle des « mers » contiguës, mais ne pouvant en provenir puisque les remparts de ces cirques ne sont pas ébréchés! D'autres détails sur la Lune sont l'indice d'une activité interne passée : les pitons centraux d'un grand nombre de cirques (difficilement explicables par le rebondissement ayant suivi l'impact), les intumescences (dômes surmontés d'un petit orifice), enfin certains cirques dont l'arène est non seulement comblée, mais encore emplie de lave « à ras bord », au point que le trop-plein s'est déversé à l'extérieur. Certes, la théorie météoritique prétend expliquer elle aussi ces détails, mais elle y arrive difficilement et reste de toute façon impuissante à nous faire comprendre pourquoi, en l'absence d'érosion atmosphérique sur la Lune, les formes les plus anciennes du relief présentent des pentes plus faibles et des sommets plus émoussés que les formes récentes (ainsi, les remparts des cirques anciens ne montent pas plus haut que le niveau du sol extérieur, tandis que ceux des cirques récents sont de véritables bourrelets en gradins). De tels aspects laissent

La face cachée de la Lune d'après les photographies de Lunik II



à croire que la croûte du sol elle-même s'est ramollie à une période donnée de l'histoire de la Lune, postérieure à celle de la formation des cirques les plus anciens. C'est à cette même époque qu'auraient eu lieu les grands épanchements des « mers ». Tout comme les corps planétaires actuellement disloqués qui ont donné naissance aux météorites, la Lune se serait réchauffée de l'intérieur peu après sa formation et alors qu'un grand nombre de cirques avaient déjà été formés. Ce réchauffement temporaire aurait ramolli la croûte superficielle elle-même, favorisé les affaissements, produit en certains points des exsudats pâteux et sur de grands espaces les épanchements de lave qui constituent les « mers ». Les grands cirques les plus récents se seraient formés ensuite sur une croûte déjà plus dure (avec projection des traînées blanches poudreuses rayonnantes); puis, les grosses mé-

teorites se faisant plus rares, il ne serait plus apparu que des craterlets avec leurs auréoles blanches, au cours des quelques milliards d'années qui ont suivi, cependant que les micrométéorites perforaient le sol à l'échelle du millimètre pour lui donner sa structure spongieuse actuelle. Il nous semble assez probable que ce schéma simplifié ne subira que des retouches mineures dans les années à venir.

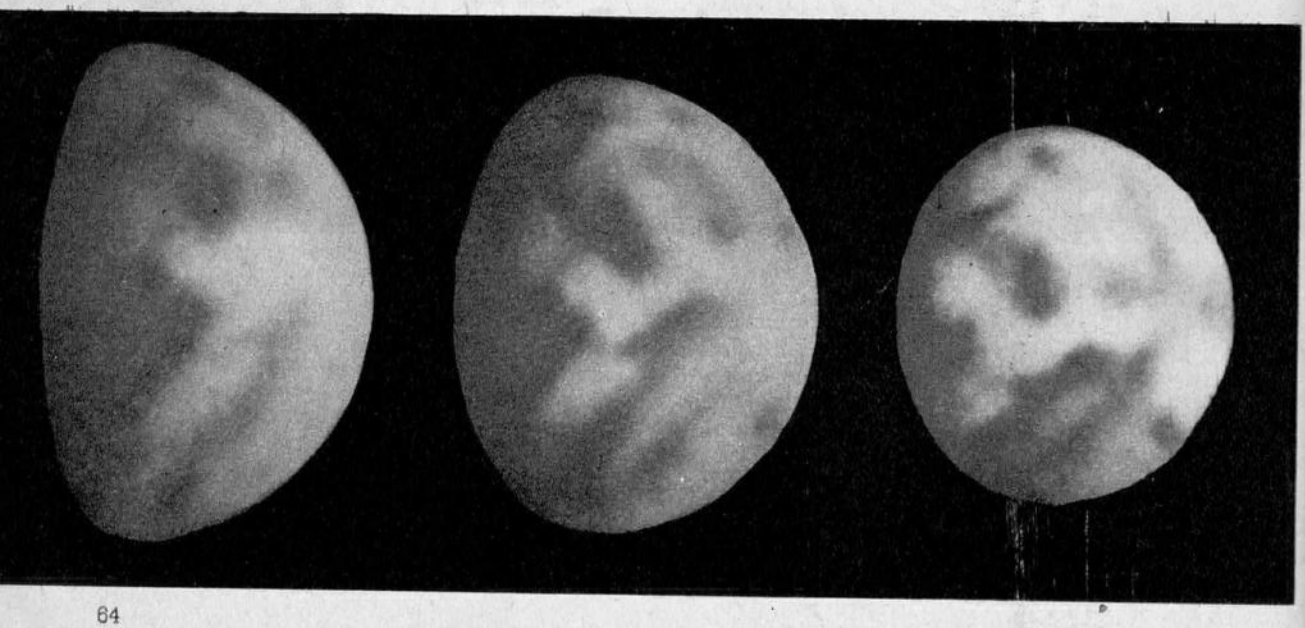
Signalons pour terminer l'observation de l'astronome soviétique Kosyrev en date du 3 avril 1958, à l'Observatoire de Crimée. Kosyrev avait pointé la fente d'un spectrographe selon un diamètre du grand cirque Alphonse, passant par le piton central de ce cirque, et avait commencé une pose photographique lorsqu'il vit à l'oculaire un nuage brillant se former au-dessus du piton puis se dissiper progressivement. En examinant la plaque développée, il découvrit que le nuage avait donné, dans la région bleue du spectre, des bandes d'émission identiques à celles du spectre des comètes et que l'on put attribuer à la molécule du carbone excitée par le rayonnement solaire. Le nuage brillant était donc une bouffée gazeuse contenant du carbone, émise par quelque orifice dans le piton central du cirque. Ceci prouve bien que des poches de gaz peuvent être occluses dans les exsudats maintenant solidifiés que sont les pitons centraux. A la faveur d'un accident ou plus vraisemblablement de la lente érosion due aux micrométéorites, l'une de ces poches, peu profonde, a été mise au jour et le gaz emprisonné depuis des milliards d'années s'est rapidement dissipé dans le vide.

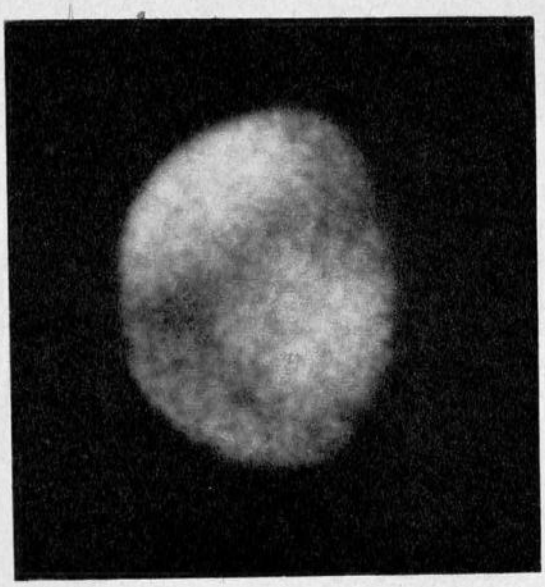
En prévision des futures explorations lunaires, un effort considérable est fait actuellement aux États-Unis pour dresser, à partir des meilleures images photographiques, une véritable carte d'état-major de notre satellite, à l'échelle de 1 millionième. Les lignes de niveau correspondent à 300 m. Ceci concerne la face visible de la Terre. On sait que l'autre face a été photographiée le 7 octobre 1959 au moyen de deux caméras par une station interplanétaire automatique lancée d'U.R.S.S., qui contourna la Lune. Les clichés obtenus, développés sur place et retransmis par radio au moyen d'un procédé de balayage des images par cellule photoélectrique, ont permis d'établir un atlas de la face arrière de la Lune. Sur cette face, il apparaît que les « mers » sont moins nombreuses que sur l'hémisphère tourné vers la Terre. Des cirques nouveaux, des auréoles claires, des chaînes de montagne ont été repérés. La détermination des coordonnées de ces détails a été obtenue à 2° près.

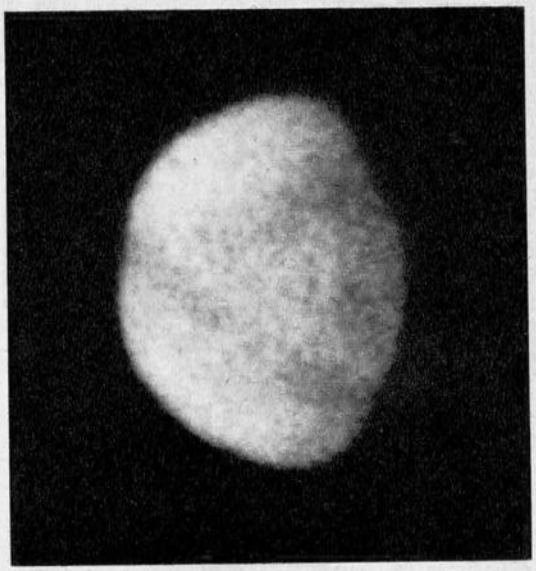
MERCURE, PLANÈTE CALCINÉE

Mercure est un astre petit, dont le diamètre n'est que le tiers du diamètre terrestre (4 700 km). C'est la planète la plus proche du Soleil (distance moyenne : 58 millions de km). Son orbite est très excentrique : à son « périhélie » (point de l'orbite le plus proche du Soleil), Mercure n'est qu'à 46 millions de km du Soleil; il s'en éloigne à 70 millions de km à l'« aphélie ».

L'orbite de la planète étant intérieure à celle







La planète Vénus photographiée en lumière violette

Sur ces deux images prises par un astronome amateur, M. Boyer, en février 1959 et septembre 1960, on observe la même formation nuageuse en forme de Y couché. Le retour périodique de cette formation (repérée de nombreuses fois lorsqu'elle n'est pas cachée par des nuées plus élevées) a permis de conclure à une rotation de l'astre en 4 jours.

de la Terre, Mercure présente des phases, tout comme la Lune. Il boucle cette orbite en 88 jours. La rotation de l'astre sur lui-même s'effectue dans le même laps de temps; autrement dit, Mercure présente toujours la même face éclairée au Soleil. Ce fait ressort de l'observation des taches permanentes de la surface de l'astre. Celles-ci semblent analogues au « mers » lunaires. Mais il a été jusqu'ici impossible, du fait de l'éloignement de la planète, d'observer les détails de son relief.

L'étude photométrique et polarimétrique de Mercure indique que le sol de l'astre est identique à celui de la Lune (surface criblée de trous et recouverte de poudre). Par ailleurs, la gravité sur Mercure est insuffisante pour que la planète ait retenu une atmosphère importante. Elle peut cependant avoir retenu quelques gaz lourds. Ce fait est confirmé par l'observation de nuées légères et variables, voilant temporairement certains détails de la surface, et par les variations de la polarisation de la lumière de Mercure. Cette atmosphère pourrait être constituée de gaz rares, se dégageant du sol, et les nuées seraient des poussières soulevées par des vents violents.

La température mesurée au couple thermoélectrique, atteint en effet 410° C pour le point ayant le Soleil au zénith, lorsque l'astre est au périhélie. Cette température suffirait à faire fondre le plomb et l'étain. Elle s'abaisse à 280° à l'aphélie. Sur l'hémisphère obscur, on calcule que la température n'excède pas 10° ou 20° absolus! Ces différences de température entraînent certainement de violents mouvements convectifs.

Mercure est un monde inhospitalier, sans eau, soumis à des conditions physiques telles qu'aucune matière organique susceptible de servir de support à la vie n'y est concevable.

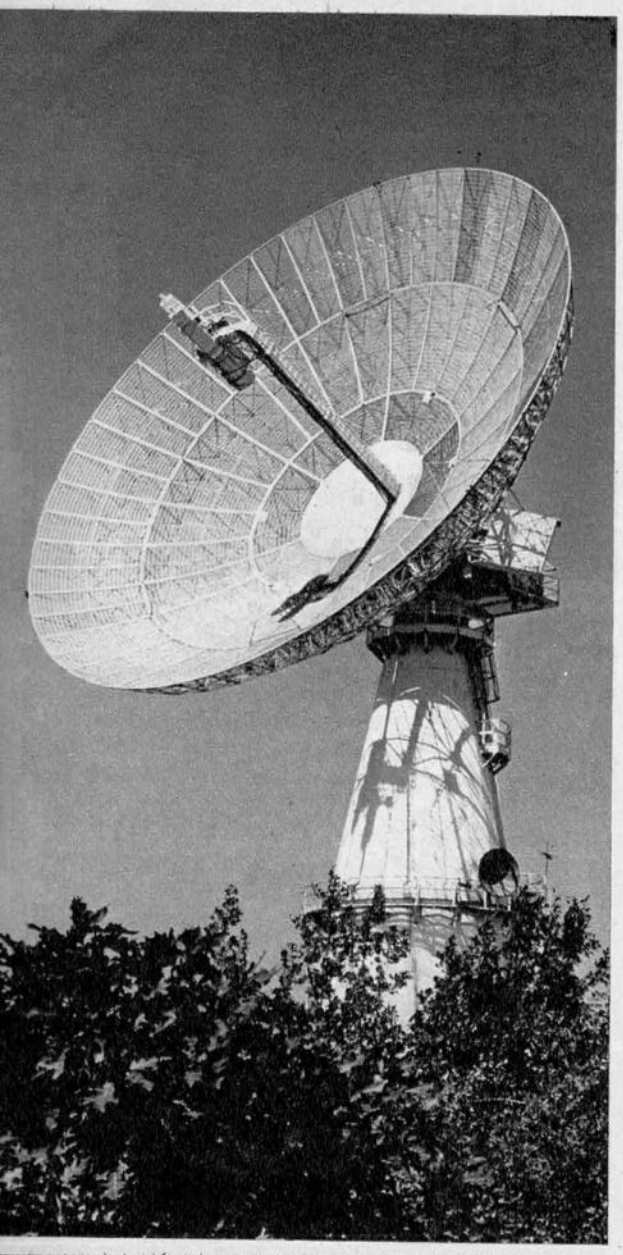
← Dessins de la planète Mercure

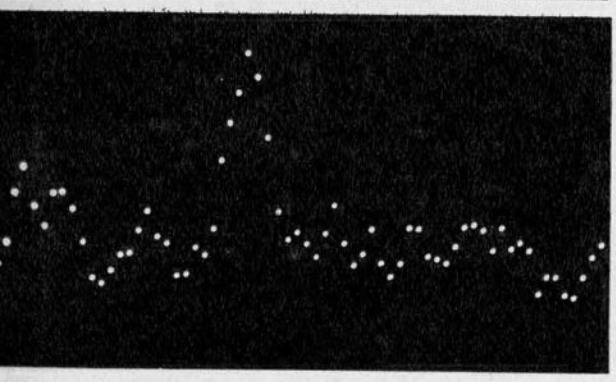
Exécutés par A. Dollfus à l'observatoire du Pic du Midi en octobre 1950, ils montrent l'évolution d'une phase. Le contraste naturel des taches de la planète a été très fortement exagéré sur ces trois dessins.

VÉNUS COUVERTE DE NUAGES

A l'inverse des autres planètes telluriques, Vénus est perpétuellement enveloppée d'un manteau nuageux qui nous en cache le sol et ne laisse voir, sur un fond éblouissant, que des taches pâles et confuses. Pour cette raison c'était, il y a peu de temps encore, l'une des planètes les moins bien connues de tout le système solaire.

Vénus tourne en 225 jours autour du Soleil sur une orbite presque circulaire, dont le rayon est de 108 millions de km. Comme





Mercure et pour la même raison, elle présente des phases. Par ses dimensions, c'est la planète qui ressemble le plus à la Terre : diamètre 12 400 km, masse 0,81 fois celle de notre planète, densité moyenne (5,1) à peine inférieure à celle de la Terre (5,5). Les deux astres sont donc presque complètement identiques par leur constitution interne. Mais ils sont bien différents par leur surface!

La détermination de la rotation de Vénus sur elle-même est un problème difficile, par suite de l'absence habituelle de configurations nettes sur le disque. Le spectroscope (effet Doppler) montre que Vénus tourne sur elle-même plus lentement que la Terre, en plusieurs jours au moins. Certains observateurs avaient cru pouvoir établir qu'elle présente toujours la même face au Soleil, mais cette rotation en 225 jours de l'astre sur lui-même ne semble pas résister aux observations modernes.

Le Soviétique Kotelnikov a établi en 1961 que la fréquence des ondes radar (de longueur d'onde 38 cm) réfléchies par Vénus est étalée, ce qui peut s'interpréter par un effet Doppler dû aux vitesses de rapprochement et d'éloignement des bords opposés du globe, par suite de la rotation. Le calcul indique que celle-ci s'accomplirait en 11 jours, si l'on suppose que l'on mesure ainsi la vitesse extrême aux bords. Mais il se pourrait qu'il n'en soit rien, et que les régions centrales du disque contribuent à la réflexion beaucoup plus que les régions marginales, auquel cas la rotation réelle serait plus rapide que 11 jours. Effectivement, sur la longueur d'onde 12,5 cm où l'on peut s'attendre que la réflexion soit encore plus spéculaire, aucun effet Doppler n'a été constaté par les Américains. Un astronome amateur français, M. Boyer, utilisant un petit télescope de sa construction, a obtenu récemment un résultat intéressant, qui confirme cette manière de voir. Photographiant depuis plusieurs années Vénus en lumière violette (ce qui fait mieux ressortir les formations nuageuses que l'observation en lumière jaune), il a pu mettre en évidence l'existence d'une configuration nuageuse en forme de Y plus ou moins facilement repérable sur de nom-

← **Échos radar sur la planète Vénus**

Le radar de Millstone Hill est en service depuis quatre ans pour l'étude de l'ionosphère et des météorites. Il a servi aussi à obtenir des échos sur la Lune et sur Vénus. De cette planète, l'écho ne revenait qu'au bout de 5 bonnes minutes et était noyé dans le « bruit » radio général. Mais le codage du signal émis a permis à une calculatrice électronique de mettre l'écho en évidence sur l'enregistrement ci-contre.

breux clichés. Faisant l'hypothèse (qui semble à première vue la plus probable) que cette formation est liée aux propriétés du sol sous-jacent, il a cherché à déduire la rotation du globe de la position du Y sur les différents clichés et a trouvé une rotation rétrograde en 4 jours. Il est remarquable que ce résultat ait été corroboré ultérieurement par l'examen de clichés photographiques obtenus au Pic du Midi et au Mont Wilson. Les derniers doutes seront levés si l'on réussit à établir, par une observation ininterrompue de Vénus en de nombreux observatoires répartis tout autour de la Terre, le déplacement lent et continu du Y entraîné par la rotation de l'astre.

La température des hautes couches atmosphériques de Vénus au-dessus des nuages, mesurée dans l'infrarouge au couple thermoélectrique, est de l'ordre de — 40° C. Les radiotélescopes ont permis de mesurer le rayonnement propre de Vénus sur des longueurs d'onde beaucoup plus longues : entre 1 cm et 22 cm, ce rayonnement correspond à une température de 300° C indépendante de la longueur d'onde, ce qui s'explique au mieux si cette température est celle du sol de Vénus (et non pas celle d'une couche ionisée entourant la planète). En outre, la température du sol sur l'hémisphère obscur n'apparaît guère inférieure à celle de l'hémisphère éclairé, indice de vents violents égalisant par convection la température en tous les points de la planète.

L'atmosphère de Vénus

A la distance du Soleil où se trouve Vénus, une telle température paraît fort élevée. Elle peut se comprendre s'il existe dans l'atmosphère de Vénus de grandes quantités de vapeur d'eau produisant un « effet de serre » important. Cette vapeur d'eau est difficile à mettre en évidence au spectrographe. En voici la raison : le polarimètre révèle que la couche supérieure des nuages est en partie constituée de petits cristaux de quelques microns de diamètre, et selon les mesures de rayonnement infrarouge de Vénus faites par Sinton, il s'agirait plus précisément de petits cristaux de glace de rayon 2,5 microns. Mais la température au-dessus de cette couche est suffisamment basse (— 40° C) pour que la quantité de vapeur d'eau précipitable y soit très faible, échappant aux mesures spectrographiques. Cette vapeur d'eau aurait cependant été détectée aux États-Unis grâce à des observations faites en ballon à 25 km d'altitude, de façon à s'affranchir des bandes de la vapeur d'eau atmosphérique terrestre.

A défaut de vapeur d'eau, le spectrographe révèle d'énormes quantités de gaz carbonique. L'oxygène libre n'a pas été décelé par ses bandes d'absorption.

Torride sous son manteau de nuages, la surface de Vénus semble impropre à toute vie, même si, comme il est probable, il existe de grandes quantités de vapeur d'eau dans la basse atmosphère de l'astre.

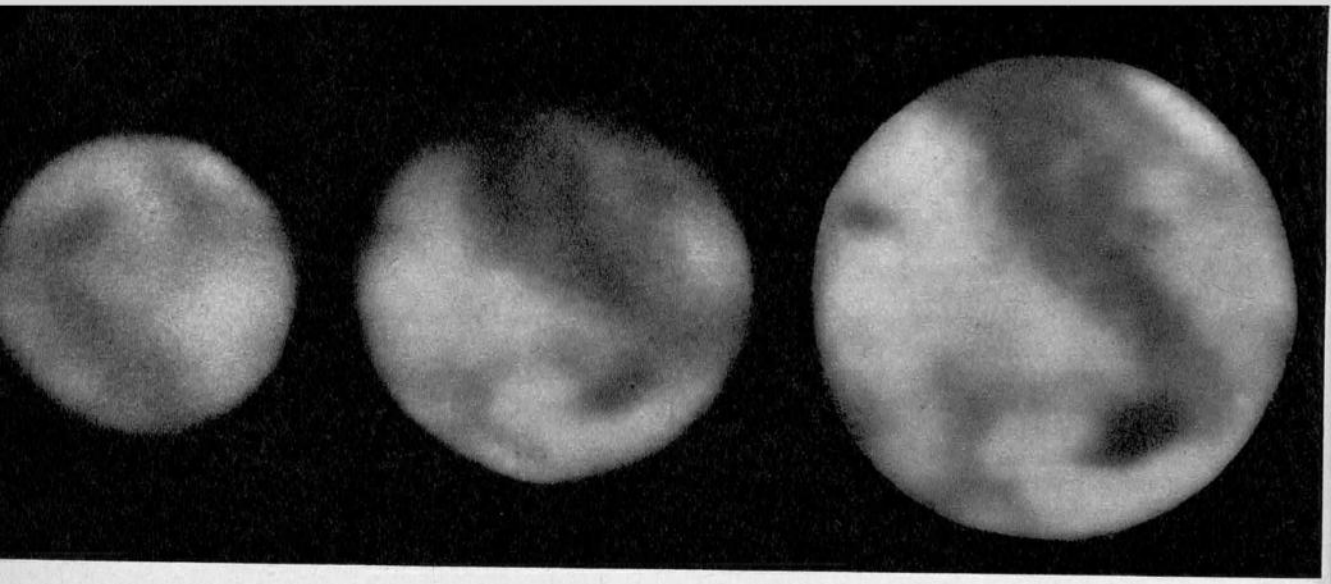
Ajoutons que Vénus semble posséder un champ magnétique important, peut-être 5 fois plus intense que celui de la Terre. L'astronome hollandais Houtgast a montré en effet que le rayonnement corpusculaire émis par le Soleil que reçoit la Terre décroît systématiquement lorsque Vénus passe entre le Soleil et notre globe, indice que ce rayonnement est alors capté par le champ magnétique de la planète interposée.

MARS, PLANÈTE VIVANTE

A la distance de 228 millions de km du Soleil, cet astre rouge boucle son orbite en 687 jours. C'est une planète plus petite que la Terre (diamètre 6 760 km), sur laquelle la pesanteur n'est que le tiers de la pesanteur terrestre. La durée du jour est à peine supérieure à la nôtre; on a pu la déterminer très exactement par l'observation des taches du sol de l'astre : Mars tourne sur lui-même en 24 h 37 mn. Son équateur est incliné de 24° 48' sur le plan de l'orbite; la planète est donc soumise à des saisons aussi accusées que les nôtres, mais près de deux fois plus longues.

A la lunette, la surface de Mars apparaît rouge orangé; elle est parsemée de taches plus sombres dont on a dressé des cartes fort détaillées. La couleur de ces taches tire un peu moins sur le rouge que le sol clair environnant, ce qui les fait paraître bleu-vert, par effet de contraste. Aux deux pôles de l'astre se voient des calottes blanches qui varient alternativement d'étendue avec les saisons, larges en hiver et presque inexistantes en été. Ces calottes polaires prouvent l'existence d'une atmosphère, laquelle est révélée également par les rares nuages blancs ou jaunâtres que l'on voit parfois s'interposer devant les taches du sol, et par la brume diffusante qui cache presque en permanence ces taches, sur les photographies en lumière bleue ou violette.

L'analyse spectrographique a montré que l'atmosphère martienne contient du gaz carbonique (deux fois plus que sur Terre, à surface égale). En revanche, l'oxygène libre n'a pas été détecté. Quant à la vapeur d'eau, elle existe indubitablement, mais en faible quantité; le polarimètre a montré, en effet, que les



caps polaires sont constitués d'eau congelée, la structure de leur surface étant celle d'une couche de givre sous faible pression atmosphérique (Dollfus). L'épaisseur de ces caps polaires ne saurait excéder quelques centimètres. En définitive, l'atmosphère de Mars se révèle ténue, comme on pouvait du reste s'y attendre du fait de la faible gravité à la surface de l'astre. La pression au sol, mesurée par différentes méthodes concordantes (diffusion de la lumière, polarisation) est un peu inférieure au 1/10 de la nôtre. La rareté de l'eau et la faible pression atmosphérique entraînent l'absence de mers et d'océans. Il est probable que l'atmosphère de Mars est principalement constituée d'azote, comme celle de la Terre du reste. Faute d'oxygène libre, et par suite d'ozone, le rayonnement ultraviolet solaire de longueur d'onde inférieure à 0,29 micron, bien que diffusé et atténué par la brume, parvient jusqu'au sol de l'astre; cependant il est totalement coupé pour les longueurs d'onde inférieures à 0,20 micron, par dissociation photochimique du gaz carbonique et de l'azote atmosphériques martiens.

La matière organique

La température du sol de Mars, mesurée au couple thermoélectrique, est très basse la nuit puisqu'elle ne dépasse pas — 60° C au Soleil levant. Elle atteint + 30° C à l'équateur, à midi, sur certaines régions sombres, et + 15° C sur les régions claires (ce qui semble indiquer

Planisphère de Mars dessiné en 1958 par J. Focas au Pic du Midi. →

Exécuté au moyen de la lunette de 60 cm d'ouverture du Pic du Midi, ce planisphère est le plus extraordinaire qui ait été jamais dessiné; tous les détails représentés sont réels et les plus petits d'entre eux mesurent une cinquantaine de km seulement. Ce résultat a pu être obtenu grâce à la très faible agitation atmosphérique à l'Observatoire du Pic du Midi. On remarquera la structure finement tachetée des grandes plaques sombres, leur incurvation en pointes qui sont le départ d'alignements grossièrement géométriques de petites taches. Ces alignements rayonnent, à travers les déserts clairs, autour de condensations plus grosses semblant jouer un rôle de centres de raccordement (ou de dispersion). Cette orographie très particulière ne se rencontre sur aucune autre planète et ne rappelle pas les vallées terrestres ou lunaires. Elle n'a pas encore reçu d'explication satisfaisante.

← Évolution des taches sur Mars

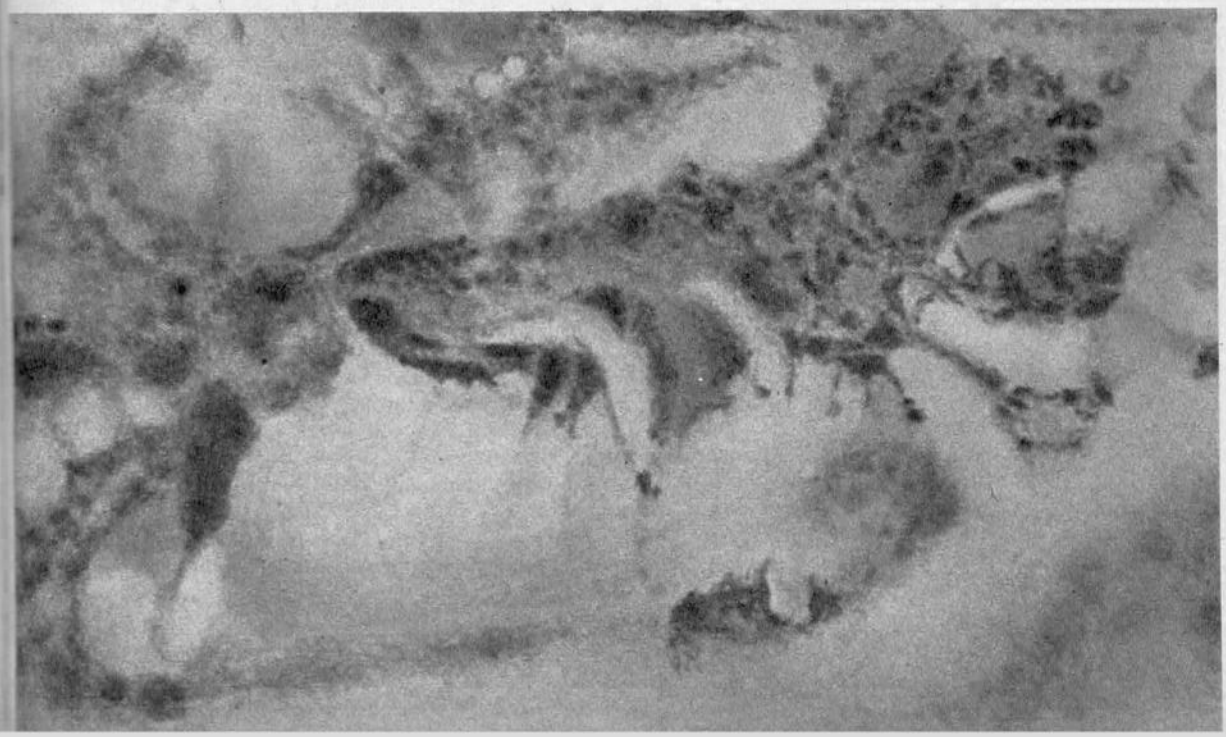
Les deux clichés de gauche ont été obtenus en 1943 et 1954 par Camichel au Pic du Midi, celui de droite par P. Guérin à l'Observatoire de Haute-Provence en 1960. Ce sont des images composites, tirées à la même échelle, qui montrent les variations du diamètre apparent de Mars suivant les oppositions. Les changements dans les taches sont liés à la poussée de la matière organique granulaire sur le sol.

que ces dernières correspondent à des plateaux élevés). L'atmosphère, légère, n'est pas un volant thermique très efficace.

Le sol des régions claires apparaît pulvérulent au polarimètre, comme celui de la Lune. Mais la nature de ce sol est différente : selon Dollfus, il serait recouvert de limonite pulvérisée (oxyde de fer hydraté). Le sol des régions sombres apparaît identique à celui des régions claires; mais Dollfus a montré qu'il se recouvre au printemps, à l'arrivée de la vapeur d'eau en provenance du pôle (sublimation du cap polaire), de petits granules sombres absorbants dont les propriétés polarimétriques sont fort différentes de celles du sol minéral sur lequel ils apparaissent. Ces petits granules, qui « poussent » ainsi sur le sol, à l'endroit des taches sombres, expliquent l'assombrissement saisonnier de ces taches, constaté depuis longtemps par tous les observateurs. Du reste, cet assombrissement n'est pas que saisonnier : parfois la matière sombre envahit, pour plusieurs années, d'immenses régions désertiques claires limitrophes des taches sombres permanentes.

Sinton a établi en 1958 et 1960 que cette matière sombre est de nature organique : elle montre, à 3,45 microns, la bande infrarouge de la liaison CH_2 des composés de la série aliphatique plus complexes que le méthane (tout comme les végétaux terrestres), ainsi que deux autres bandes à 3,58 et 3,69 microns qui semblent caractériser l'acétaldéhyde.

Il est à peu près impossible de comprendre comment cette matière organique granulaire peut se développer avec l'arrivée de la vapeur d'eau atmosphérique, en certaines régions privilégiées de la planète, sur un sol primitivement désertique, et s'y maintenir de façon stable pendant plusieurs mois, si elle n'est pas le produit d'une manifestation vitale. Il y a longtemps que les observateurs de Mars avaient supposé que les changements d'intensité et d'étendue des taches sombres de l'astre étaient l'indice d'une végétation. Certains savants avaient rejeté *a priori* cette hypothèse sous le prétexte que toute vie terrestre tant soit peu évoluée dépérirait immédiatement sur Mars par suite de la rigueur du climat, de l'absence d'oxygène libre et de l'action abiotique de l'ultraviolet; or il semble maintenant bien prouvé par l'observation que la vie existe sur la planète voisine, et il n'est même plus possible de prétendre que cette vie est forcément de nature primitive. Car la planète a le même âge que la Terre et, si la vie y est apparue il y a quelques milliards d'années, nul ne peut affirmer qu'elle n'a pas évolué, comme toute vie, vers des formes de plus en plus complexes, en s'adaptant aux conditions locales. L'assimilation de la « végétation » martienne



à des formes de vie ressemblant à nos lichens relève de l'anthropocentrisme; la rapidité de l'extension de cette « végétation » au printemps suffit d'ailleurs pour réfuter cette interprétation. Certaines bactéries chromogènes, selon Dollfus, polarisent la lumière à la façon des granules sombres observés sur Mars; cependant le polarimètre est incapable de nous renseigner sur la nature macroscopique de cette matière sombre, de sorte qu'on ignore même si les granules en question représentent des entités individuelles comme des bactéries ou s'ils appartiennent à des organismes plus vastes dont ils recouvriraient la surface. Autant dire que nous ne savons rien des formes que revêt la vie sur Mars. La présence probable d'acétaldéhyde au-dessus des régions sombres évoquerait tout au plus un métabolisme anaérobie, l'énergie étant fournie par décomposition des hydrates de carbone en acétaldéhyde et alcool au lieu de résulter, comme sur Terre, de l'oxydation des hydrates de carbone. Mais ce n'est qu'hypothèses.

Les « canaux » de Mars

Rien n'indique non plus la présence d'une vie intelligente sur Mars, encore qu'il soit imprudent de nier *a priori* une telle éventualité. Les « canaux » minces et rectilignes dessinés naguère, et dont la réalité eût prouvé indubitablement l'existence des Martiens, ne sont pas les lignes géométriques que l'on crut observer : ils apparaissent, dans les meilleurs instruments, comme des alignements irréguliers (quoique grossièrement géométriques) de petites taches sombres traversant les déserts. Ces directions préférentielles, ces alignements qui semblent « savoir » où ils vont n'ont pas reçu d'explication satisfaisante, mais rien ne démontre qu'ils soient l'indice d'une organisation intelligente.

Ajoutons que Mars est entouré de deux satellites minuscules (gros comme Paris) : Phobos et Deimos, tournant rapidement à faible distance de la planète. On a cru remarquer que Phobos (le plus proche de Mars) accélère son mouvement autour de la planète, indice qu'il « tomberait » progressivement vers elle, par freinage dans les très hautes couches ultra-raréfiées de l'atmosphère martienne. Le Soviétique Chklovski a montré qu'un tel freinage ne serait efficace qu'à condition de supposer la densité de Phobos si faible qu'il s'agirait nécessairement d'une sphère creuse, donc d'origine artificielle (construite par les Martiens). Mais, en fait, l'accélération du mouvement de Phobos ne semble pas établie encore avec certitude, de sorte que l'explication de Chklovski est prématurée.

LES GROSSES PLANÈTES

Comme nous l'avons dit plus haut, la caractéristique principale des grosses planètes est leur faible densité. Il faut y ajouter la rapidité de leur rotation sur elles-mêmes, entraînant un aplatissement polaire très marqué de ces astres. Cet aplatissement est cependant plus faible que celui d'une planète homogène animée du même mouvement de rotation : on en déduit que la densité centrale des grosses planètes surpasse de beaucoup leur densité moyenne, la densité superficielle étant de ce fait très faible. La rotation des couches superficielles (celles que nous observons) ne se fait d'ailleurs pas d'un bloc, la vitesse décroissant des régions équatoriales vers les pôles; en outre, les bords du disque des grosses planètes sont fortement assombris. Ces faits témoignent de l'existence autour de ces astres d'une atmosphère importante.

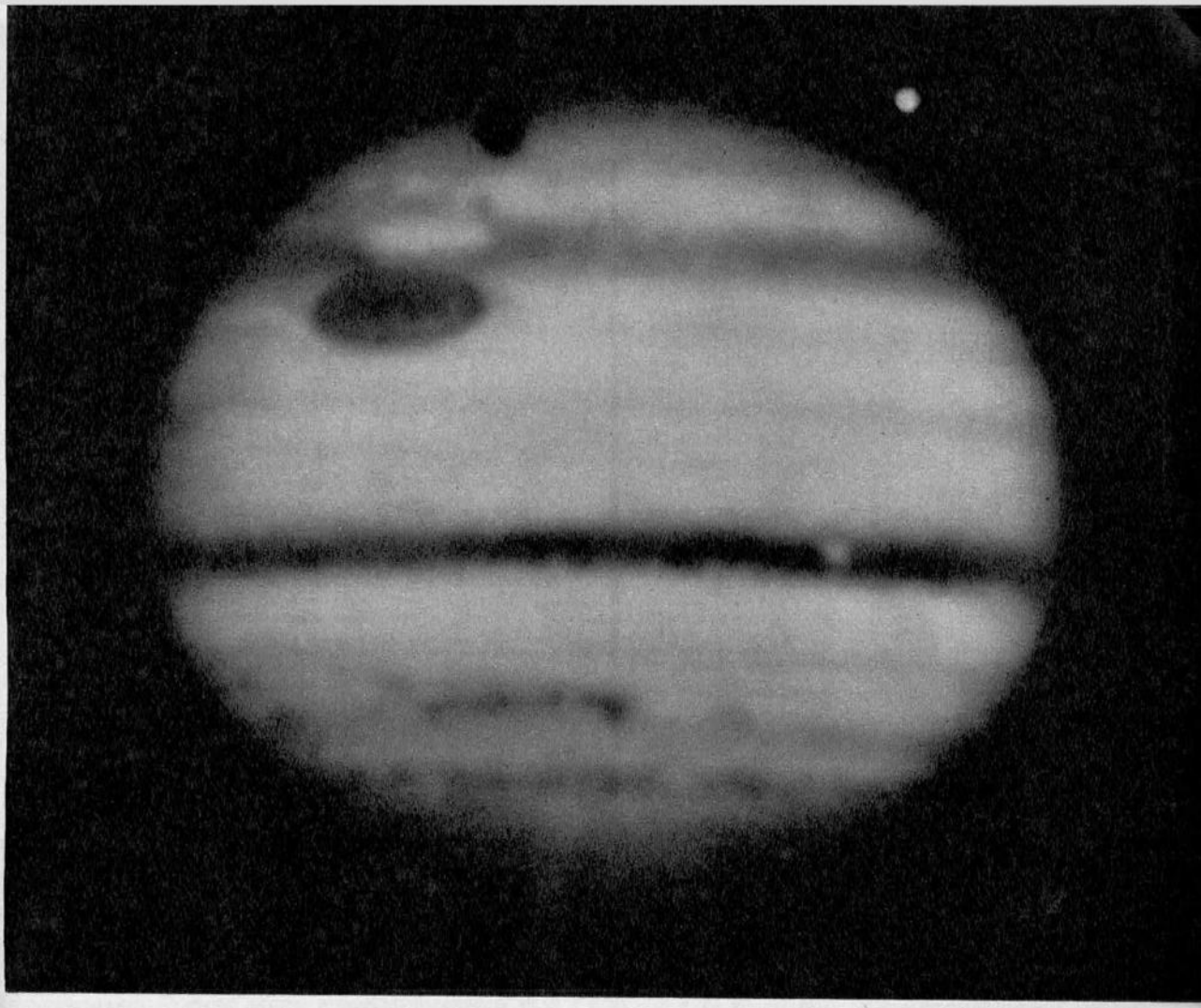
Le spectre des grosses planètes montre de larges bandes dues au méthane et à l'ammoniac (Jupiter et Saturne) ou au méthane seul (Uranus et Neptune). La faible densité de ces astres s'explique par leur nature gazeuse, si l'on suppose qu'ils sont constitués principalement d'hydrogène et d'hélium. La pression suffit à liquéfier ces gaz puis à les solidifier, à mesure que l'on s'enfonce à l'intérieur de la planète. La température superficielle, mesurée au couple thermoélectrique, est très basse, et il est certain que l'intérieur des grosses planètes n'est pas porté à haute température (comme on le croyait naguère), sinon l'hydrogène et l'hélium se seraient échappés.

Enfin, les grosses planètes possèdent de nombreux satellites, dont les plus gros sont de taille comparable à celle de la Lune.

JUPITER

Jupiter, la plus grosse de toutes les planètes, boucle son orbite en un peu plus de 11 ans, à la distance de 778 millions de km du Soleil. La rotation de l'astre sur lui-même s'effectue autour d'un axe presque perpendiculaire au plan de l'orbite (absence de saisons), en un peu moins de 10 heures. Le diamètre équatorial de Jupiter vaut 11 fois celui de la Terre (143 000 km); la densité moyenne de l'astre est de 1,36.

Le disque de la planète, de couleur jaune citron, est sillonné de bandes sombres gris bleuté, parallèles à l'équateur et plus ou moins déchiquetées. Ces bandes subissent des changements continuels, elles correspondent sans doute à de gigantesques courants atmosphériques. La rotation équatoriale s'accomplit en 9 h 50 mn alors que celle des bandes



Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar

LA PLANÈTE JUPITER, photographiée en lumière bleue au Mont Palomar. La tache rouge, en forme de large ovale sombre, est bien visible ici. On remarquera le satellite Ganymède et son ombre portée sur la planète.

sombres qui bordent l'équateur vaut 9 h 56 mn. Quelques détails cependant apparaissent permanents, telle la « tache rouge », de couleur rose saumon, longue de 50 000 km et large de 11 000, qui dérive dans la zone tempérée sud entre deux courants animés d'une vitesse relative de 350 km/h.

La température mesurée des couches supérieures de l'atmosphère de Jupiter est de — 140° C. On ignore quelle est la température des couches plus profondes, qui sont le siège des phénomènes météorologiques observés. Certains ont supposé que cette température est très basse (— 175° C), au point de faire cristalliser l'ammoniac. La tache rouge serait un composé du sodium et de l'ammoniac. D'autres ont émis récemment l'hypothèse que l'atmosphère jovienne pourrait jouer un rôle de serre efficace, la température atteignant 0° à + 10° C à une certaine profondeur.

Jupiter possède 12 satellites : 4 gros, connus depuis Galilée et visibles dans la moindre lunette, et 8 minuscules, découverts la plupart par la photographie.

Les gros satellites sont : Io, Europe, Ganymède et Callisto. Ils tournent autour de la planète dans le plan équatorial de celle-ci. Le plus gros (Ganymède) est de dimension supérieure à celles de la Lune et de Mercure, puisqu'il atteint 5 150 km de diamètre. Ces astres montrent des taches permanentes, visibles dans les plus grands instruments, et présentent toujours la même face à Jupiter. Ganymède possède une atmosphère et des calottes polaires. La densité de ces corps, bien que plus élevée que celle de Jupiter, est cependant faible et témoigne d'une structure quelque peu différente de celle des planètes telluriques. Ils sont sans doute constitués de glace, pour une part non négligeable. La tem-

Les émissions radio de Jupiter

L'OBSERVATION radio de Jupiter a conduit à l'une des découvertes les plus inattendues de la radioastronomie. En 1957, les Américains Burke et Franklin annonçaient qu'ils venaient de détecter un rayonnement de basse fréquence (longueur d'onde de l'ordre de 11 m) en provenance de la planète. L'intensité de cette émission est considérable, dépassant celle de toutes les radiosources connues. Elle se présente sous forme de sursauts intenses et groupés, l'activité se poursuivant durant des périodes aussi longues que 1 ou 2 heures. Chaque sursaut dure environ 1 seconde, mais il existe des sursauts de quelques millisecondes. En outre, ce « bruit » radio est polarisé tout comme celui qui est produit par les éruptions chromosphériques solaires. La source émettrice est localisée à la surface de Jupiter, l'émission passant par un maximum à chaque tour de la planète sur elle-même. La vitesse de rotation correspond à celle des régions de latitude élevée. En 1955-1956 la source avait même longitude que la tache rouge, mais sa durée de rotation s'est finalement révélée légèrement différente et aucune corrélation n'apparaît plus maintenant.

L'émission observée est maximum vers 15 m de longueur d'onde. On ne l'entend plus au-dessous de 10 m et elle est fort affaiblie par l'absorption de notre propre ionosphère au-dessus de 20 m. L'intensité, comparée à celle des décharges orageuses terrestres, est plusieurs milliards de fois plus grande. Cette émission est à l'heure actuelle une énigme pour les radioastronomes.

En revanche, on connaît maintenant l'origine d'une autre anomalie du rayonnement jovien sur ondes centimétriques et décimétriques. Ce rayonnement est beaucoup trop intense pour être attribué au rayonnement thermique de la planète. Il est émis par des électrons de grande énergie freinés par le champ magnétique de l'astre, électrons contenus dans l'exosphère jovienne et formant une zone de particules analogue aux ceintures de Van Allen découvertes autour de la Terre grâce aux premiers satellites artificiels. On a réussi très récemment à mesurer les dimensions de cette zone et a déduire, de la polarisation des ondes radio, la direction du champ magnétique de Jupiter.

A. BOISCHOT
Astronome-Adjoint à l'Observatoire de Meudon.

pérature de leur surface est probablement très basse, encore que l'atmosphère de Ganymède produise peut-être un effet de serre important. Quant aux 8 autres satellites, ils paraissent être des astéroïdes captés.

SATURNE

Saturne avec son magnifique système d'anneaux, gravite à 1,5 milliard de km du Soleil, en 29 ans 1/2. Un peu plus petite que Jupiter (diamètre équatorial 120 000 km) et encore plus aplatie, cette planète tourne sur elle-même en 10 h 1/4. L'équateur de Saturne est incliné de 27° sur le plan de l'orbite. La densité de l'astre est seulement de 0,7.

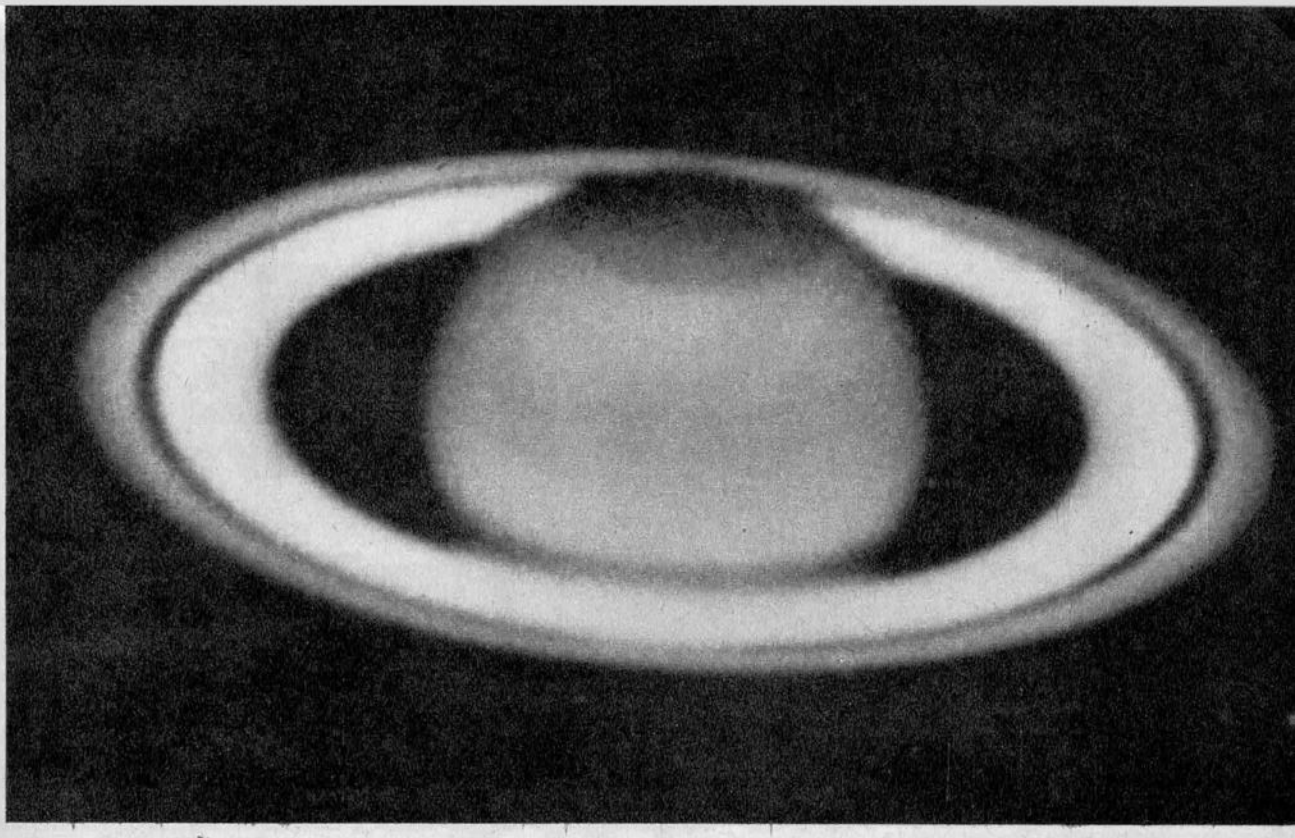
Au télescope, le globe de Saturne montre, comme celui de Jupiter, des bandes parallèles à l'équateur, mais plus pâles et moins déchiquetées. La température des couches superficielles de l'astre est de — 145° C.

L'anneau plat, d'une extrême minceur (80 km au plus) est situé très exactement dans le plan équatorial de la planète. Son diamètre extérieur atteint 276 000 km, son diamètre intérieur 140 000 km. En réalité, il n'y a pas un, mais plusieurs anneaux concentriques, d'éclats inégaux. L'anneau extérieur est séparé de l'anneau médian (le plus brillant) par la division de Cassini, ligne noire de 4 200 km de large. L'anneau intérieur est très sombre et la planète s'aperçoit à travers. Ces anneaux sont formés d'une multitude de satellites minuscules isolés, qu'on ne voit pas séparément. Cela permet à l'anneau d'être stable, ces blocs tournant avec des vitesses variables selon leur distance de Saturne (selon la 3ème loi de Képler). L'attraction du renflement équatorial de Saturne interdit aux particules de sortir du plan de l'équateur de l'astre. La partie la plus brillante de l'anneau médian possède presque le pouvoir réflecteur de la neige; elle est peut-être formée de particules d'eau congelée.

Saturne possède 10 satellites. Le plus gros, Titan, dépasse la Lune en diamètre (4 200 km). Il possède une atmosphère dans laquelle le spectrographe révèle les bandes du méthane.

URANUS

Uranus est quatre fois plus gros que la Terre (diamètre 51 000 km) et sa densité n'est que 1,2. Il gravite à 3 milliards de km du Soleil en 84 ans. La planète, qui tourne sur elle-même en moins de 11 heures dans le sens rétrograde, autour d'un axe presque couché sur le plan de l'orbite, présente un aplatissement intermédiaire entre celui de Jupiter et de Saturne. Des bandes très pâles sont visibles sur sa surface. La température superfi-



LA PLANÈTE SATURNE, photographiée avec la lunette de 91 cm de l'observatoire Lick. On remarquera la nette différence de teinte entre les deux anneaux externes et la division noire, dite de Cassini, qui les sépare.

cielle de l'astre est de — 180° C. Le spectrographe révèle, outre la présence du méthane, celle de l'hydrogène moléculaire et de la molécule hydrogène-deutérium.

Uranus possède 5 satellites, qui tournent également dans le sens rétrograde. Le plus gros mesure 1 700 km de diamètre.

NEPTUNE

Neptune, à 4,5 milliards de km, boucle son orbite en 165 ans. Un peu plus petit qu'Uranus (diamètre 45 000 km), il ne montre pas d'aplatissement apparent. Sa densité est de 2,1. On observe à sa surface des taches irrégulières, mais, vu l'éloignement de l'astre, celles-ci ne sont visibles qu'avec les plus grands instruments. La rotation du globe s'accomplit en moins de 16 heures. Les bandes du méthane sont seules visibles dans le spectre. La température superficielle est évaluée à — 200° C. Neptune possède deux satellites, l'un de ceux-ci, Triton, paraît presque aussi gros que Mars.

PLUTON

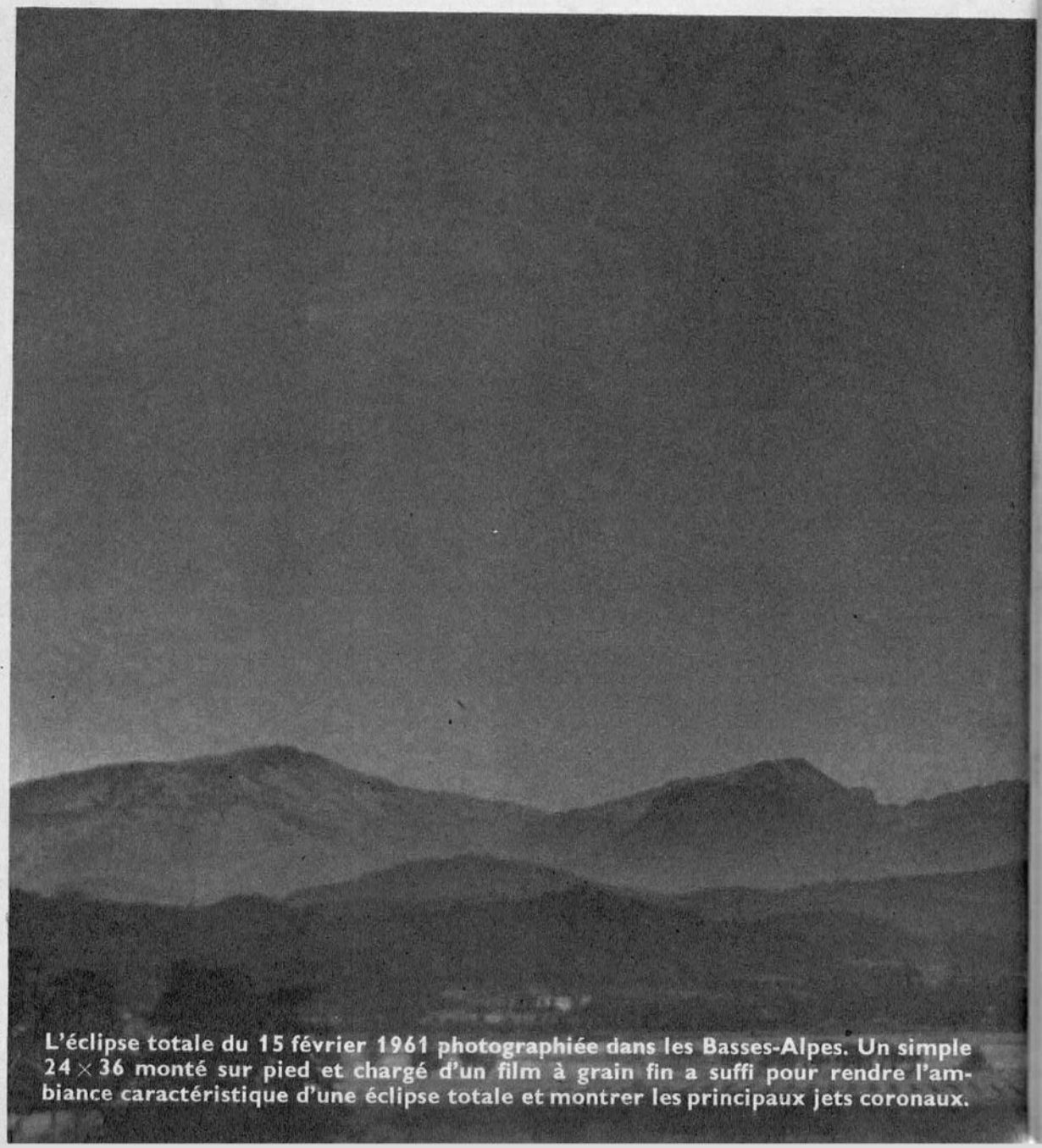
Aux confins du système solaire, enfin, Pluton ne peut être considéré comme une grosse planète, ni par ses dimensions, ni par sa densité.

L'orbite de Pluton est extrêmement elliptique, de sorte que la distance de l'astre au Soleil varie entre 4,5 milliards et 7,5 milliards de km. La masse de Pluton, déterminée d'après les perturbations qu'elle apporte aux mouvements d'Uranus et de Neptune, est à peine supérieure à celle de la Terre. Mais le diamètre de Pluton, mesuré par Kuiper, semble inférieur à la moitié de celui de la Terre, ce qui conduit à une densité égale à deux fois et demie celle de l'or ou du platine ! Aucun minéral ne possède une densité aussi élevée, ce qui a laissé croire à certains que la surface de Pluton est recouverte entièrement d'une couche de glace qui réfléchit spéculairement la lumière solaire : ainsi le diamètre mesuré (celui d'une petite calotte sphérique brillante) serait sensiblement inférieur au diamètre réel. Mais ceci semble en contradiction avec la présence de taches sur la planète, taches que l'on ne peut pas observer directement, vu l'exiguïté du disque, mais que l'on a décelées en mesurant les variations d'éclat de l'astre dues à sa rotation sur lui-même.

La température de Pluton doit être voisine du zéro absolu.

P. Guérin
Chargé de recherches à l'Inst. d'Astrophysique de Paris.

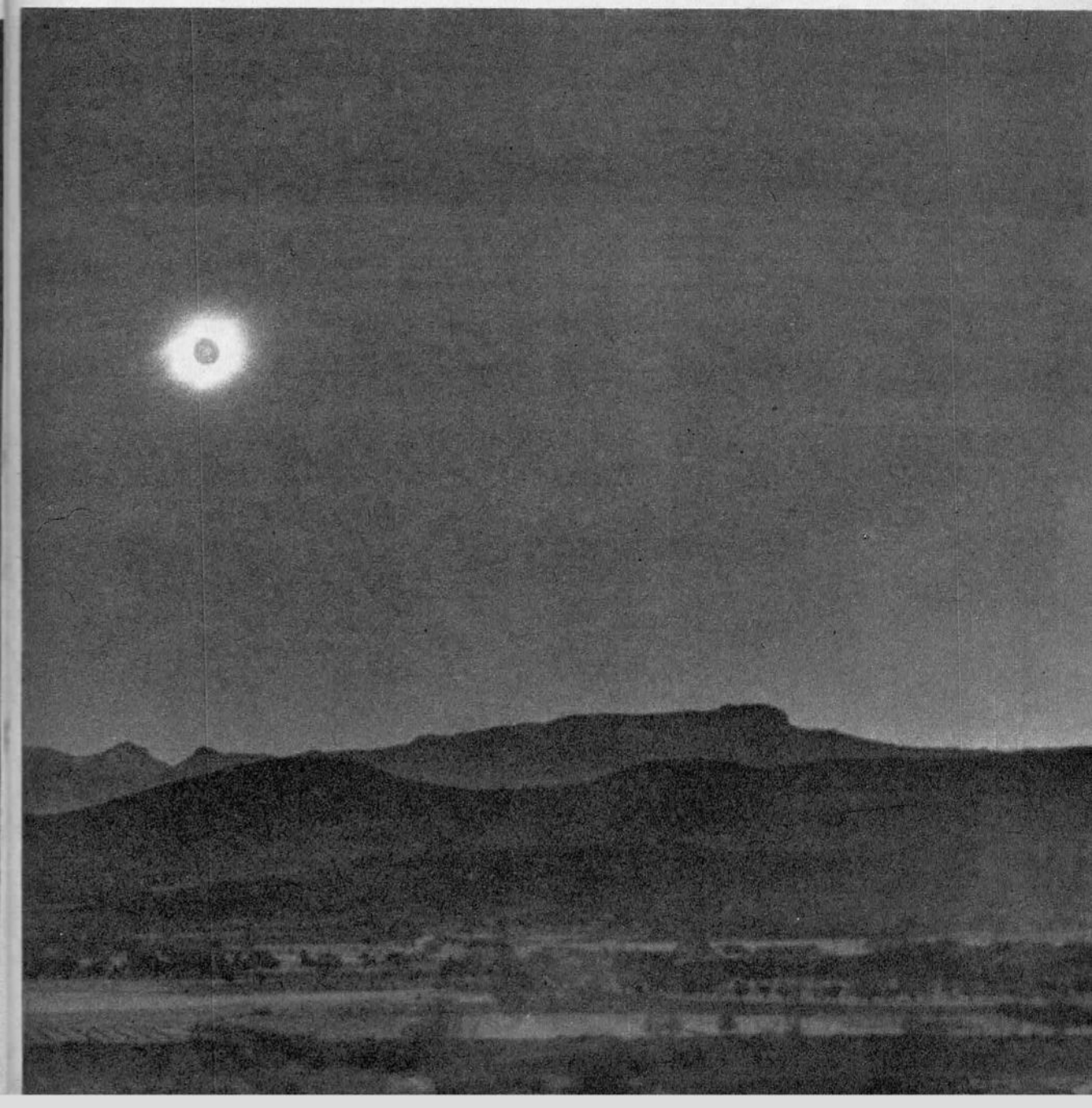
LE SOLEIL



L'éclipse totale du 15 février 1961 photographiée dans les Basses-Alpes. Un simple 24 × 36 monté sur pied et chargé d'un film à grain fin a suffi pour rendre l'ambiance caractéristique d'une éclipse totale et montrer les principaux jets coronaux.

Ph. P. Guérin

BIEN que le Soleil ne soit qu'une petite étoile parmi les 100 milliards d'individus analogues réunis dans la Voie Lactée, l'étude de cet astre tient une place de choix dans le développement de la connaissance. Elle se trouve à un carrefour de la science, où viennent se côtoyer des disciplines très diverses. Les géophysiciens ont besoin d'être tenus au courant jour par jour de ce qui se passe sur le Soleil afin d'interpréter leurs...



... observations de la haute atmosphère, des aurores polaires, du champ géomagnétique. Les physiciens, cherchant à « domestiquer » l'énergie nucléaire, s'efforcent de reproduire au laboratoire les conditions de l'intérieur du Soleil. Ce n'est pas par hasard qu'un groupe de savants calcule au centre nucléaire de Los Alamos la structure interne et l'évolution de l'astre; ou qu'inversement à l'Observatoire astrophysique de Crimée une installation importante permet aux astronomes de produire des décharges électriques de grande énergie dans l'hydrogène, afin de comparer leur spectre lumineux à celui des éruptions solaires.

Dans l'histoire de l'astronomie solaire, et aussi dans son présent, on trouve ainsi certains des exemples les plus frappants de l'unité profonde de la science.

Le Soleil et son atmosphère

Le disque solaire, vu en lumière blanche, semble limité par un bord parfaitement net, comme si l'astre avait une surface définie. Ceci bien sûr n'est qu'une apparence, car le Soleil est entièrement à l'état gazeux et ne saurait avoir de « surface » : au delà du bord apparent s'étendent encore des couches de gaz, mais de densité si faible qu'elles sont presque complètement transparentes, et par conséquent invisibles sur le fond du ciel. La sphère solaire, limitée au niveau perceptible en lumière blanche, a un rayon de 696 000 km (109 fois celui de la Terre à l'équateur). Pour en finir avec les mensurations de la vedette, ajoutons les chiffres suivants : masse $1{,}99.10^{33}$ grammes (330 000 fois la Terre); densité moyenne 1,41; accélération de la pesanteur à la surface de l'astre 28 g.

Le Soleil émet chaque seconde sous forme de rayonnement une énergie de 38.10^{22} kilowatts, soit environ 6,2 kW par cm^2 de sa surface. Bien que la Terre ne recueille qu'une infime partie de l'énergie solaire, le Soleil au zénith fournit à chaque mètre carré de surface terrestre une puissance de 1 390 watts (ou 2 calories par minute et par cm^2, quantité connue sous le nom de « constante solaire »). Cette énergie rayonnante se répartit de manière très inégale sur l'ensemble du spectre des ondes électromagnétiques : le pic de la courbe d'énergie se situe dans le spectre visible entre les longueurs d'ondes 4 500 et 5 000 Å. Mais le rayonnement solaire s'étend vers les grandes longueurs d'ondes jusqu'aux ondes radioélectriques décamétriques, à travers le spectre infrarouge et les hautes fréquences radioélectriques; et vers les petites jusqu'aux rayons X « mous ».

La couronne solaire →

Cette photographie a été prise à Hvar, en Yougoslavie, lors de l'éclipse totale du 15 février 1961. De nombreux filaments lumineux vers les pôles semblent dessiner les lignes de force d'un champ magnétique.

Notre connaissance du Soleil en 1962 s'appuie sur les informations recueillies par une foule de techniques relevant de l'astrophysique classique, de la radioastronomie et de la recherche spatiale. Aussi, par le biais de la technique, l'astronomie solaire a-t-elle attiré des physiciens de formations très diverses. Presque tous ont su dépasser les limites de leur spécialité et comprendre que les données enregistrées par tel ou tel procédé ne prennent un sens que lorsqu'elles sont intégrées à la masse des connaissances : il y a des tours solaires, des radiotélescopes, des compteurs de photons à bord des satellites ou des caméras à rayons X à bord des fusées.

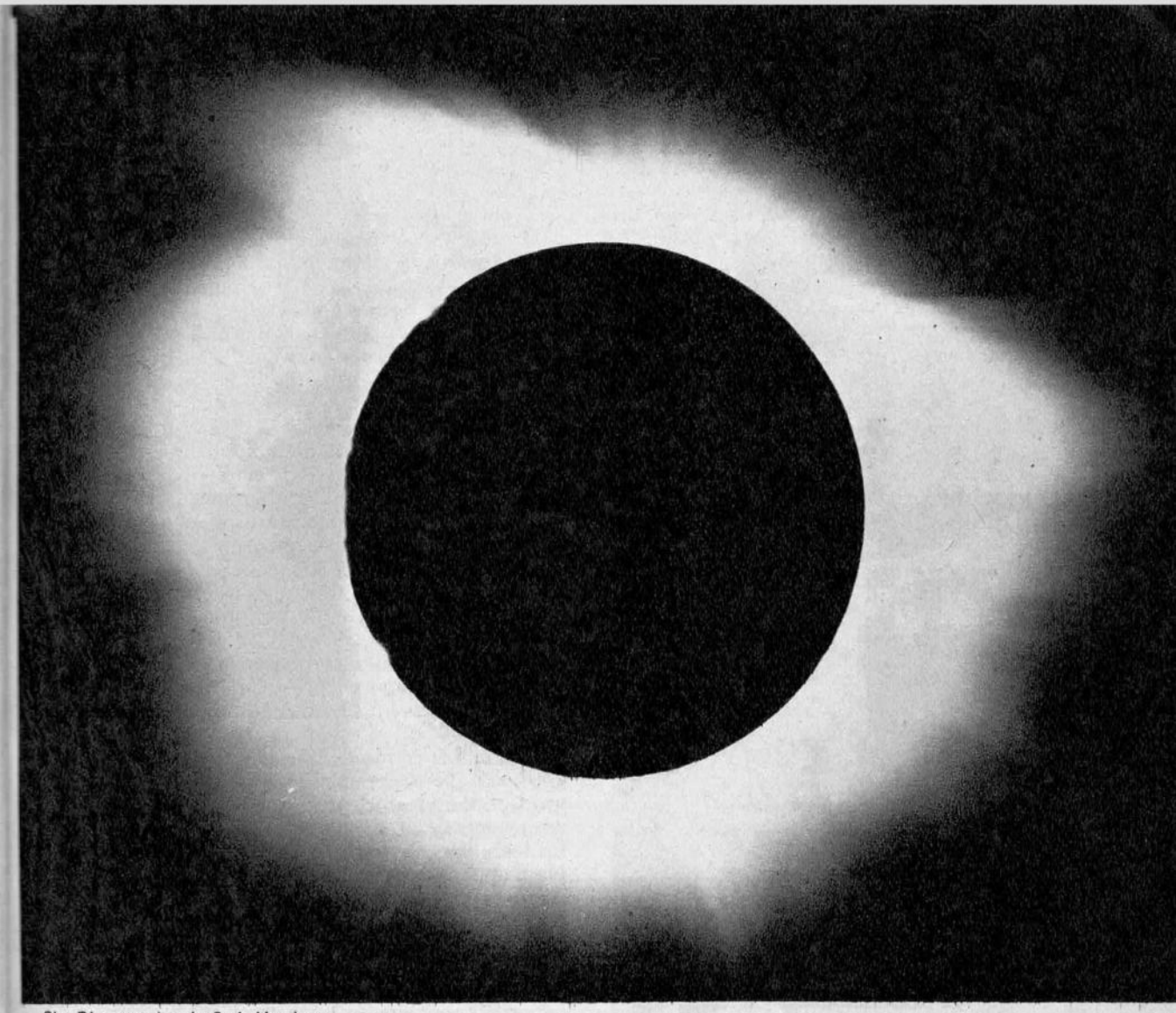
L'énergie rayonnée par le Soleil provient des réactions nucléaires qui se produisent de manière permanente dans les régions centrales de l'astre grâce à leur température très élevée : plus de 10 millions de degrés. Dans ces réactions, il y a transformation progressive de l'hydrogène en hélium avec production sous forme de rayons X d'une quantité d'énergie équivalant à 8/1 000 de la masse d'hydrogène consommée. Cette énergie est transmise progressivement vers la surface avec intervention des trois mécanismes classiques de transfert de chaleur : rayonnement, convection et conduction. Elle émerge finalement sous forme de radiations.

Comme le gaz solaire est partiellement transparent, la lumière qui arrive à nos instruments provient, non d'un niveau déterminé, mais d'un ensemble de couches qui constituent l'atmosphère solaire. Cependant, si l'on « regarde » le Soleil avec une radiation pour laquelle son atmosphère est relativement transparente, on « voit » évidemment des couches relativement profondes. Au contraire, une radiation pour laquelle le gaz solaire est opaque n'émergera que des couches externes et ne nous montrera que celles-ci.

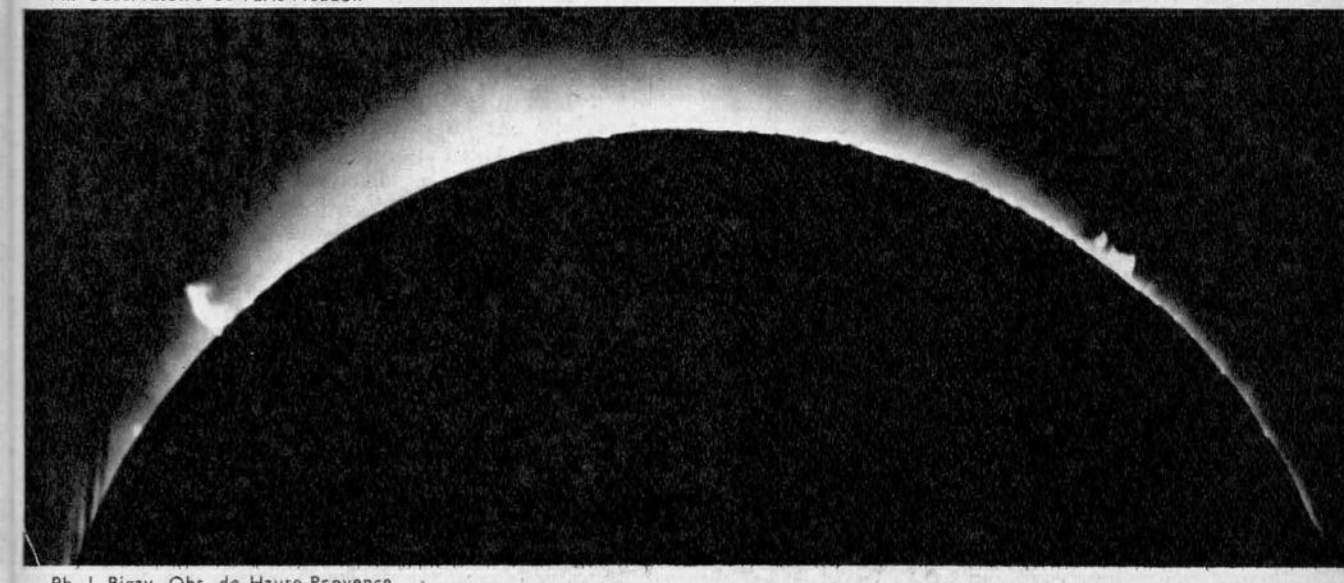
Nous sommes donc conduits à faire correspondre à chaque radiation émise par le Soleil, depuis les rayons X jusqu'aux ondes radioélectriques, un « niveau effectif » de forma-

La couronne interne →

Elle est vue ici avec ses protubérances lors d'une éclipse. La frange chromosphérique brillante est bien visible en haut et à droite. On remarquera les indentations noires dues au relief du bord de la Lune.



Ph. Observatoire de Paris-Meudon



Ph. J. Bigay, Obs. de Haute-Provence.

tion dépendant de l'opacité particulière du gaz solaire à cette radiation.

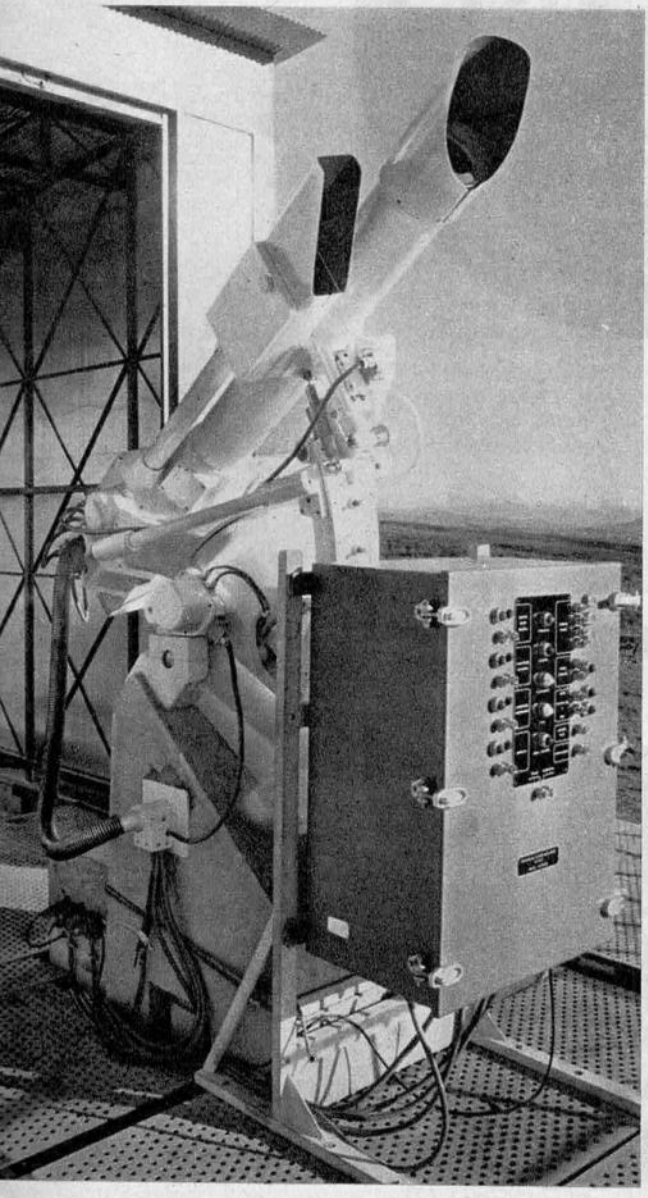
Ainsi la « photosphère » sera la couche d'où nous parvient le spectre continu visible du Soleil, et ses principales propriétés pourront être mises en évidence par des observations très simples en lumière blanche.

Les éclipses totales de Soleil vont nous fournir le moyen de faire connaissance avec des couches solaires extérieures à la photosphère. Lorsque la Lune vient, pour de brèves minutes, masquer le disque éblouissant, on voit que la photosphère est bordée d'une frange colorée d'un beau rose, dite « chromosphère »; de son sommet irrégulier s'élèvent de petites flammèches appelées « spicules ». La hauteur apparente de la chromosphère n'excède pas 10 000 km. Sa brillance est environ 1/1 000 de celle de la photosphère.

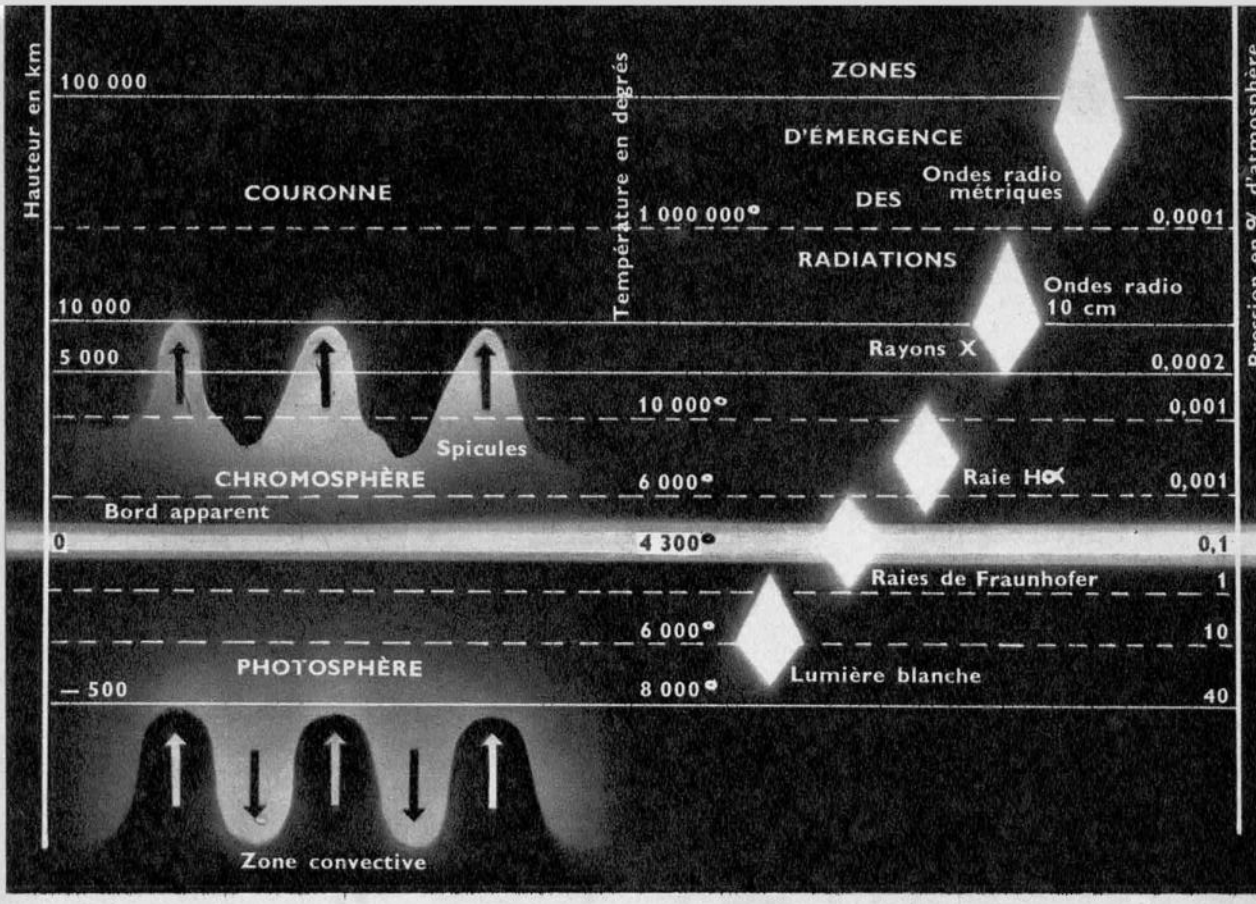
Au delà s'étend une auréole immense, aisément discernable sur le ciel sombre de l'éclipse totale jusqu'à 30' du bord de la Lune. C'est la « couronne », dont l'apparition mystérieuse donne toute sa beauté au grandiose phénomène de l'éclipse. La couronne est blanche; sa brillance au voisinage du limbe solaire est seulement 1 millionième de celle de la photosphère, et décroît d'ailleurs rapidement avec la distance. Elle n'a pas de limite définie et il y a transition progressive de cette enveloppe externe du Soleil au milieu interplanétaire.

Cette classification de l'atmosphère solaire en trois couches est extrêmement commode car il y a de grandes différences entre les propriétés moyennes des trois régions et les techniques qui permettent de les observer sont distinctes.

Outre la classification en trois couches, l'observation impose encore une autre distinction fondamentale, entre atmosphère solaire *normale* et atmosphère *perturbée*. Une photographie en lumière blanche montre, par exemple, que l'ensemble de la photosphère a un aspect uniforme, avec une structure fine monotone ayant l'apparence de « granules » brillants sur un fond sombre. De place en place apparaissent de grandes taches sombres, parfois simples et isolées, parfois en groupes complexes. Les taches solaires sont fixes (ou presque) à la surface de l'astre, mais ne vivent que quelques jours ou quelques semaines. D'autres techniques d'observation montrent qu'autour des taches, la chromosphère et la couronne sont perturbées de manière profonde. Un groupe de taches et la région avoisinante constituent un « centre d'activité » qui est le siège de nombreux phénomènes temporaires tels que les protubérances et les éruptions solaires. Le nombre, les positions et l'étendue des centres d'activité présents à la surface solaire varient d'un jour à l'autre suivant des lois dont la plus importante est celle du cycle de onze ans de l'activité solaire. En dehors de ces régions perturbées qui couvrent au maximum 30 % de la surface solaire, les propriétés de l'atmosphère solaire sont à première vue indépendantes du temps et du point considéré : on peut donc parler d'une atmosphère « normale » à laquelle se superposent des perturbations.



← **L'héliographe monochromatique de l'Observatoire de Haute-Provence.**



Résumé schématique des propriétés moyennes (température, pression) des couches de l'atmosphère solaire ; à droite les régions d'où proviennent divers rayonnements.

Les astronomes contemporains pensent avoir trouvé le fil conducteur qui permet d'expliquer toutes les propriétés des centres d'activité : il s'agit de régions où existent des champs magnétiques relativement forts, qui varient de 5 gauss environ, à la limite extérieure de la perturbation, jusqu'à des maximums de 2 000 gauss et plus dans les taches. Bien que le champ magnétique des taches ait été découvert dès 1908, son rôle essentiel dans l'ensemble des phénomènes de l'activité solaire n'a été que progressivement dégagé.

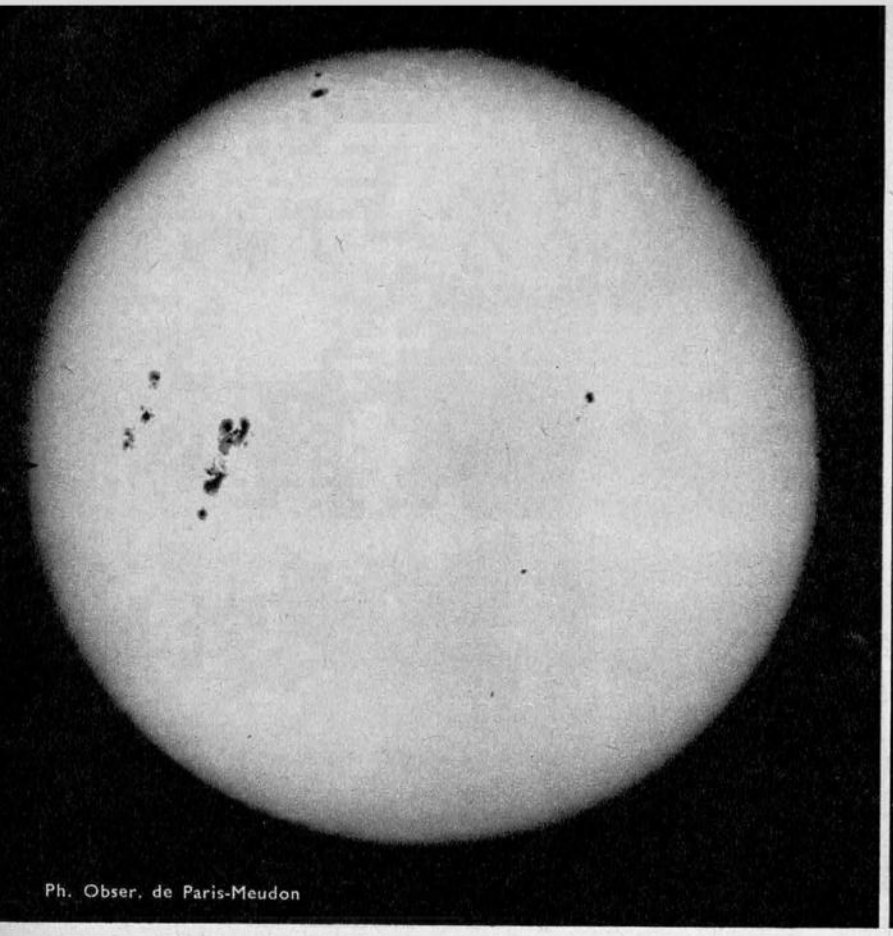
Les tours solaires

Dans le domaine optique auquel nous nous bornerons ici, car les instruments radioastronomiques sont décrits par ailleurs, l'astronomie solaire emploie une très grande variété d'appareils. Ils possèdent leur physionomie propre pour deux raisons : d'une part, le Soleil est une source lumineuse très intense et l'on peut pousser au maximum la finesse de l'analyse spectrale sans être gêné par le manque de lumière; d'autre part, les problèmes essentiels de la physique solaire portent sur les fins détails de sa surface : il importe donc de disposer d'images de l'astre grandes et de haute définition.

L'instrumentation type pour l'étude optique du Soleil est la « tour solaire ». Elle comporte un télescope de très grande longueur focale (10 m ou plus) et d'ouverture modérée (40 cm en moyenne). Ce téléscope est fixe; son axe, vertical, est celui de la tour. Au sommet de celle-ci, la lumière est captée par un système de miroirs plans dont l'un est mobile, pour compenser le mouvement diurne. Au foyer du télescope se forme une image du Soleil dont le diamètre est couramment 10 ou 20 cm. Cette image est analysée par un spectrographe très dispersif, à haute résolution, installé à poste fixe.

La tour solaire la plus ancienne et la plus haute est celle de Mont Wilson. L'observatoire de Meudon projette une « tour d'observation » (conçue comme tour solaire, mais aussi pour l'observation des satellites artificiels) de 36 m de hauteur. Au sommet, deux miroirs plans de quartz de 70 cm de diamètre dirigeront la lumière sur un télescope à miroirs de 60 cm d'ouverture utile.

Signalons que la tour solaire n'est nullement une disposition impérative; le télescope



Ph. Obser. de Paris-Meudon

Le Soleil photographié avec différentes radiations

En lumière blanche, à gauche, apparaît la photosphère avec plusieurs groupes de taches. Avec la raie Hα de l'hydrogène, on distingue un grand nombre de filaments sombres (ou protubérances) et autour des

peut aussi être horizontal comme dans les installations de Meudon et du Pic du Midi; ou oblique comme dans le télescope solaire géant en construction à Kitt Peak, aux États-Unis, qui n'aura pas moins de 90 m de longueur focale, pour une ouverture utile proche de 1 m.

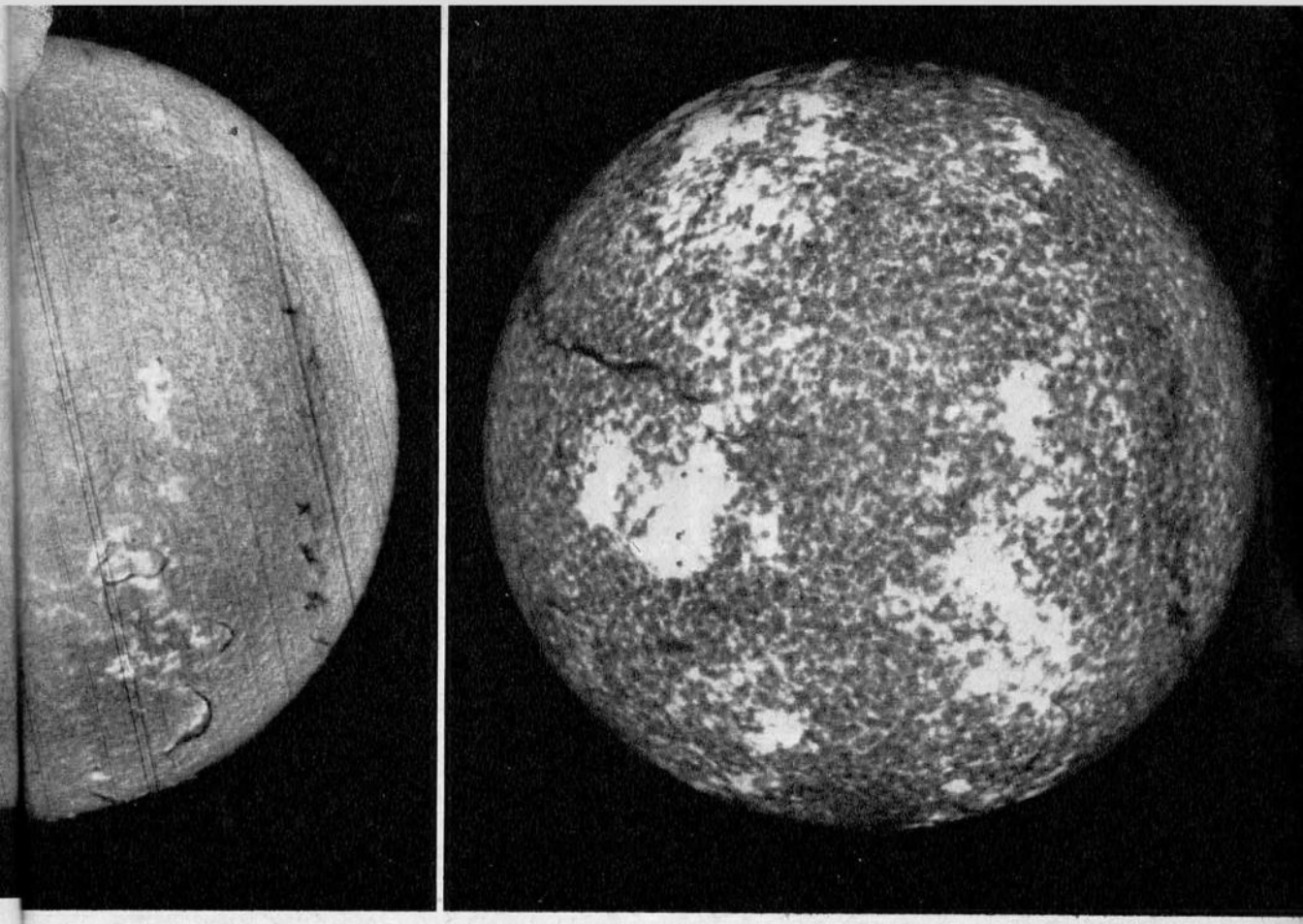
Cependant les tours solaires ont l'avantage d'aller capter le faisceau lumineux utile à une grande hauteur, avant la traversée des couches d'air turbulentes qui se forment au contact du sol. La lumière descend ensuite de la tour à l'intérieur d'un tube isolé au point de vue thermique, où la circulation de l'air est lente et régulière. En revanche, les tours solaires seraient sensibles au vent si des précautions spéciales de construction n'étaient prises. Celle de Meudon comportera en fait deux tours indépendantes : une structure interne portant le coelostat et le télescope, et une enveloppe externe protégeant la première du vent et portant escalier et ascenseur.

L'observatoire de Sacramento Peak étudie une tour solaire révolutionnaire où tout le trajet de la lumière « prélevée » au sommet de la tour s'effectuera dans le vide afin d'éviter toute turbulence sur le faisceau. Malheureusement ces précautions pourraient rester illusoires à cause des effets néfastes de l'atmosphère terrestre elle-même sur la qualité de l'image. L'idéal consisterait à observer en dehors de la basse atmosphère; le projet « Stratoscope » américain comporte l'envoi de télescopes automatiques dans la stratosphère grâce à des ballons. Comme on l'a vu dans un précédent chapitre, c'est ainsi qu'ont été obtenues les plus belles photographies de la surface solaire.

Les spectrographes solaires

Les grands spectrographes en usage pour l'étude du Soleil sont des merveilles de perfection optique et mécanique.

L'appareil dispersif est toujours un grand réseau de diffraction. Le spectre est focalisé sur la plaque photographique (ou sur tout



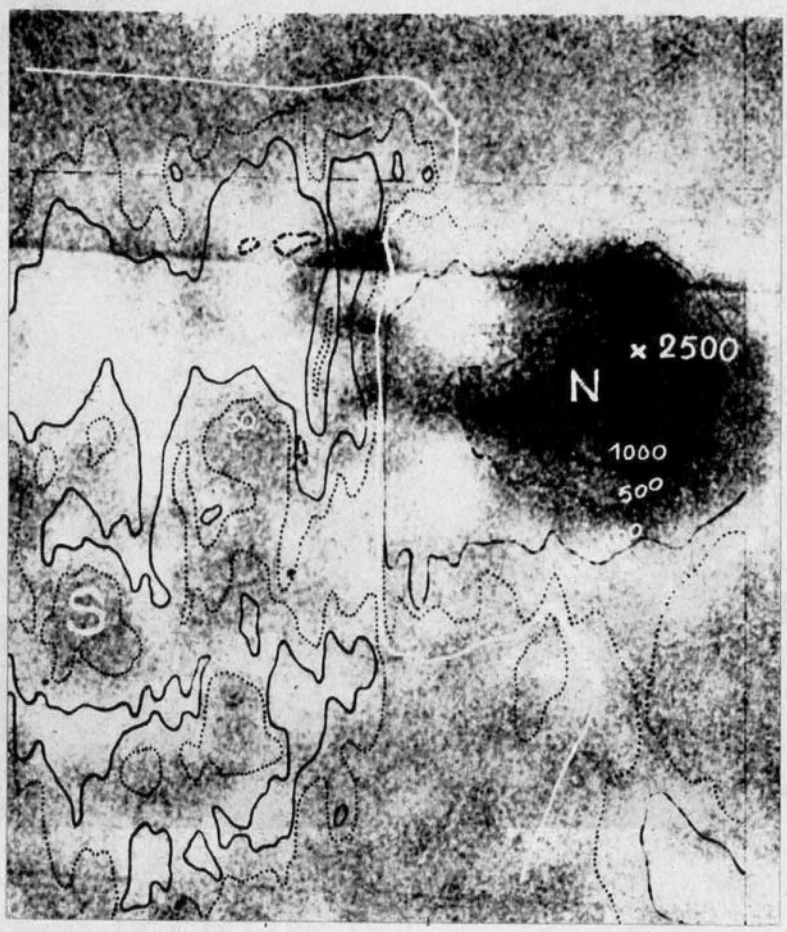
taches une structure vaguement tourbillonnaire dont l'analogie avec les « spectres magnétiques » (figures dessinées par la limaille de fer dont on saupoudre un papier posé sur un aimant) encouragea à rechercher le champ magnétique des taches. Avec la raie ultraviolette du calcium, à droite, protubérances et filaments sont moins opaques, mais les plages faculaires entourant les taches ont leur maximum d'extension.

autre récepteur) par un objectif à grande focale. Par exemple, le spectrographe du Pic du Midi a une focale de 9 m; il peut séparer deux radiations monochromatiques distantes de 0,012 Å, et l'ensemble du spectre visible (4 000-7 000 Å) est étalé sur plus de 10 m. Ce spectre peut être photographié par longueurs de 24 cm; on peut aussi l'enregistrer à l'aide d'un récepteur photoélectrique ou photographier de petites sections avec la caméra électronique Lallemand.

Parmi les techniques d'exploitation des spectrogrammes, il nous faut citer au moins celle qui permet la mesure des petits déplacements des raies d'absorption et par conséquent des mouvements et des champs magnétiques de la photosphère. Rappelons que l'effet Doppler-Fizeau (déplacement des raies proportionnel à la vitesse radiale de la source lumineuse) révèle les mouvements du gaz lumineux selon la ligne de visée. Il existe un autre effet, l'effet Zeeman, qui consiste en la décomposition d'une raie avec déplacement symétrique de deux de ses composantes sous l'effet d'un champ magnétique. Cet effet permet la mesure des champs magnétiques même localisés à la surface du Soleil, ou tout au moins de la composante « longitudinale » de ces champs. (Cependant Dollfus et Leroy, à l'Observatoire de Meudon, ont imaginé une méthode ingénieuse qui fournit également une mesure approchée de la grandeur et de l'orientation d'un champ magnétique transversal sur la surface solaire.) La spectroscopie fournit ainsi des données qui jouent un rôle essentiel dans nos connaissances sur la dynamique de l'atmosphère solaire.

Images monochromatiques du Soleil

Puisque le niveau d'origine d'une radiation dépend de l'opacité particulière de l'atmosphère de l'astre pour cette radiation, on pourra observer divers niveaux en étudiant des raies plus ou moins fortes. En particulier, la photographie du Soleil avec la lumière ayant



Doc. Obs. de Paris-Meudon

Carte du champ magnétique sur une image de la chromosphère

Les lignes d'égale valeur du champ magnétique (isogauss) à la surface du Soleil ont été dessinées sur cette figure à la manière des lignes de niveau sur une carte géographique. La carte du champ magnétique ainsi obtenue a été superposée à un spectrohéliogramme du calcium montrant la chromosphère dans la région d'une grande tache. Il s'agit d'un centre d'activité âgé, comportant une grande tache de polarité Nord où le champ atteint une valeur élevée, 2 500 gauss, dans la partie centrale noire. La polarité Sud est représentée par des champs assez faibles, de l'ordre de quelques dizaines de gauss seulement, couvrant une large surface sur les plages faculaires brillantes.

la longueur d'onde d'une très forte raie fournira une image des niveaux supérieurs de la photosphère, voire de la chromosphère elle-même. Les photographies monochromatiques constituent de ce fait une technique particulièrement précieuse en physique solaire.

On peut les obtenir au moyen du « spectrohéliographe ». C'est un spectrographe monochromateur qui permet d'isoler, au moyen d'une fente sélectrice placée dans le plan du spectre, telle raie monochromatique que l'on choisit à l'avance. Fente d'entrée et fente sélectrice sont suffisamment hautes pour couvrir un diamètre de l'image solaire. Si l'on déplace simultanément cette image sur la fente d'entrée et, derrière la fente sélectrice, une plaque photographique, celle-ci enregistre ligne par ligne une image complète du Soleil dans la radiation isolée par l'instrument. Les « filtres monochromatiques polarisants » conçus par B. Lyot permettent, sans balayage mécanique, d'obtenir le même résultat. Ils sont beaucoup plus compacts et légers et peuvent se fixer à une petite lunette qui suit automatiquement le Soleil. L'ensemble porte le nom « d'héliographe monochromatique ». Des films continus de la chromosphère ont été obtenus au moyen de tels instruments, avec ajustement automatique du temps de pose selon l'état du ciel. Leur multiplication a permis d'assurer une surveillance permanente des phénomènes solaires (tels que les éruptions) en réunissant les bandes filmées tournées dans des observatoires répartis tout autour du globe.

Le coronographe

Pour en finir avec l'arsenal particulier à l'astronomie solaire, il faut citer le célèbre « coronographe » de Lyot, le premier instrument qui ait permis l'observation de la couronne en dehors des éclipses totales. La couronne est presque totalement transparente pour toutes les radiations optiques. Cependant, en montagne et par beau temps, la bril-

lance du ciel bleu peut n'être que 10 fois à peine celle de la couronne : celle-ci devrait donc se détacher nettement. Il n'en est rien en général, parce que les instruments d'optique produisent une lumière diffuse parasite. Il appartenait à B. Lyot d'inventorier les causes nombreuses de cette lumière parasite (reflets de verres, diffraction par le contour de l'objectif et par les poussières et rayures de sa surface) et d'y remédier au maximum dans une lunette spéciale. Son coronographe permet, sous les cieux favorables au moins, d'observer visuellement, de photographier et « spectrographier » la couronne.

Lyot lui-même a donné le principe d'autres méthodes qui permettent de détecter la couronne sur le fond du ciel, même sans coronographe. Ses idées ont conduit à la réalisation de divers types de « coronomètres ». On peut ajouter à cela que les ondes radioélectriques solaires sont émises par la couronne qui devient opaque aux longueurs d'ondes supérieures à quelques centimètres : ainsi presque toute la radioastronomie solaire a la couronne pour objet d'étude.

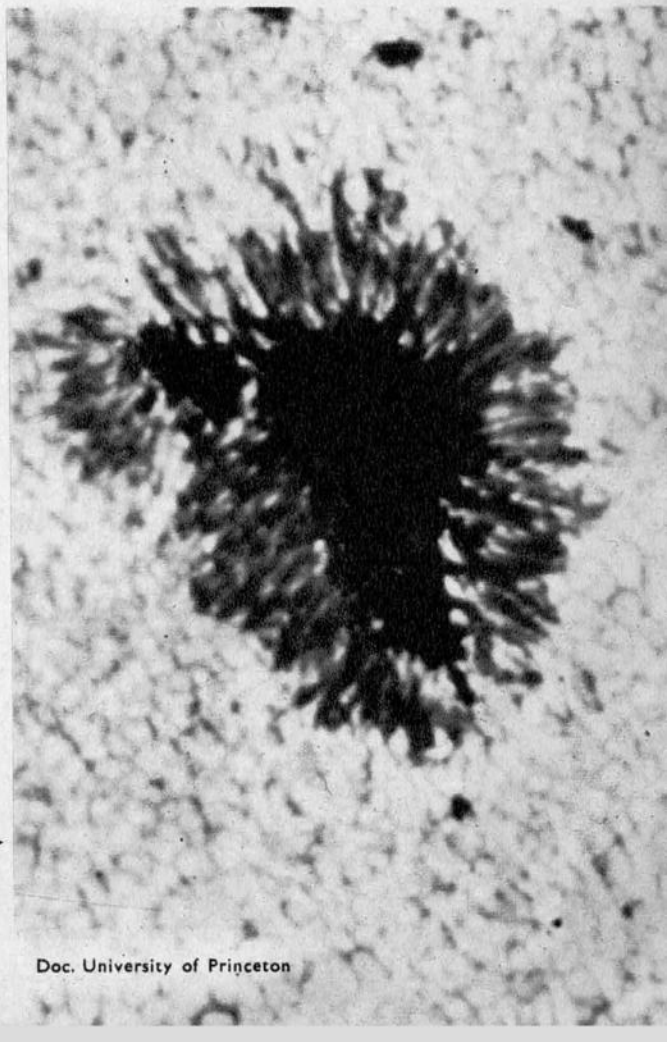
L'atmosphère solaire normale

Le but de la science étant de faire tenir le maximum de connaissances dans le volume minimum (par exemple celui d'une formule de quelques lettres), les astronomes solaires ont longtemps cherché un « modèle » de l'atmosphère normale. Supposant que les propriétés physiques des couches successives du Soleil ne dépendent que de leur profondeur, le « modèle » serait une table donnant la température, la pression, la densité, etc. aux différents niveaux. Pour être un bon résumé de notre savoir, le modèle doit satisfaire à deux conditions : d'une part on doit pouvoir en déduire par application des lois du rayonnement des gaz l'ensemble des propriétés observables du spectre solaire. D'autre part, il est souhaitable que l'on puisse expliquer par les théories physiques les propriétés de l'atmosphère modèle en les rattachant à une conception d'ensemble du Soleil.

Sur la figure page 79 on a reporté quelques-uns des paramètres qui définissent un modèle schématique de l'atmosphère solaire. Les altitudes y sont comptées à partir du niveau correspondant au bord du Soleil en lumière blanche. La photosphère située au-dessous de ce niveau est une couche mince (400-500 km) où température et pression augmentent rapidement quand on s'enfonce, 4 200° K environ à la « surface » et 7 000° au niveau — 400 km. Vers l'extérieur, la température, paradoxalement, augmente à nouveau et atteint environ un million de degrés K dans la couronne. Celle-ci a une pression très faible mais qui décroît lentement vers l'extérieur. Les preuves de son énorme température sont nombreuses : parmi elles on peut citer l'apparence du spectre optique de la couronne : sur un fond continu dû à la diffusion de la lumière solaire par les électrons libres du gaz coronal, se détachent un petit nombre de raies d'émission.

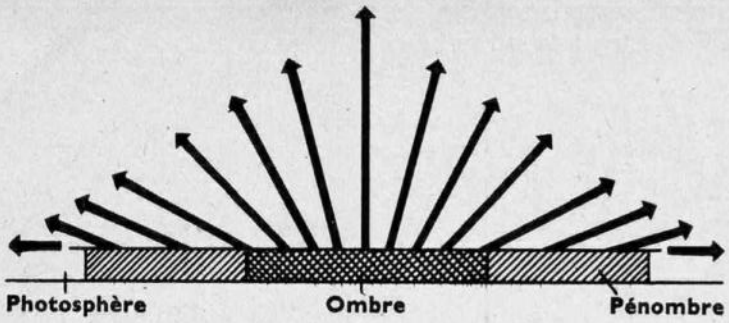
L'origine de ces raies, longtemps mystérieuses, a été élucidée par Edlen en 1942; elles appartiennent au spectre d'atomes courants (Fe, Ca, Ni, etc.) très fortement ionisés : la raie verte à 5 303° A est due à Fe XIV, c'est-à-dire à l'atome de fer dépouillé de 13 électrons sur 26!

Malgré les raffinements apportés au modèle « homogène » de l'atmosphère solaire, il ne satisfait plus les spécialistes pour trois grandes raisons, l'une empirique et les autres



Structure fine d'une tache solaire, cliché pris en ballon (projet Stratoscope). →

Doc. University of Princeton



Le champ à la surface d'une tache solaire

Les flèches indiquent la grandeur du champ magnétique et la direction des lignes de force. Elles sont verticales dans l'ombre et couchées dans la pénombre.

théoriques, que nous allons examiner successivement :

1° L'observation directe montre que ni la photosphère ni, encore moins, la chromosphère et la couronne ne sont homogènes. Nous avons déjà évoqué les granules brillants, de 1 000 km de diamètre, qui couvrent la photosphère : ils montrent que la température ne varie pas seulement avec la profondeur mais encore fluctue de ± 200° environ à un niveau donné. La grande largeur des raies et leur aspect sinueux sont révélateurs de mouvements désordonnés dans la photosphère avec des vitesses voisines de 2 ou 3 km/s. Inhomogénéité et mouvements « turbulents » s'accentuent dans la chromosphère : au niveau 5 000 km, par exemple, des jets de gaz relativement denses et « froids » (20 000°!) se précipitent à 30 km/s à travers le gaz très raréfié et très chaud (1 000 000°) de la couronne. La notion d'une température moyenne n'a plus de sens.

2° La théorie du transfert de l'énergie à l'intérieur du Soleil et des étoiles permet de prévoir selon quels mécanismes la chaleur se propage du centre à la surface de l'étoile : la conduction (relativement peu importante), le rayonnement et la convection. Dans la plus grande partie de l'astre, l'énergie peut être écoulée par le rayonnement, mais il n'en est plus ainsi dans une couche épaisse située juste au-dessous de la photosphère et que l'on appelle « zone convective ». La chaleur y est transportée par les mouvements de convection : des « bulles » de gaz chaud montent comme des ballons, d'autres plus froides redescendent. Cet énorme bouillonnement s'amortit avant d'envahir la photosphère, mais théorie et observation montrent qu'il en reste quelque chose : une structure thermique et dynamique complexe dont il nous faut comprendre la nature exacte.

3° Une couche d'atmosphère stable tend à prendre un état d'équilibre imposé par les forces qui agissent sur elle (la gravité par exemple) et par l'énergie qu'elle reçoit des couches intérieures (ou extérieures éventuellement). On peut prévoir assez aisément cet équilibre en ce qui concerne la photosphère, et l'on trouve un état de température et pression très proche de celui qu'on peut déduire des propriétés observables. La couronne aussi est dans un tel état d'équilibre, mais celui-ci ne peut être expliqué sans faire intervenir une source d'énergie qui rende compte de la très haute température du gaz coronal. Il nous faut trouver un moyen de « chauffer » la couronne pour expliquer son existence!

Ondes acoustiques et ondes de choc

Il y a plus de 10 ans, les physiciens Biermann (de Göttingen) et Schwarzschild (de Princeton) ont proposé un schéma d'explication des trois grands problèmes que nous venons d'évoquer. Leur théorie est basée sur le rôle de l'énergie mécanique dans l'atmosphère solaire. Une partie de l'énergie cinétique correspondant aux mouvements convectifs dans la zone sub-photosphérique peut sortir de cette zone et se propager dans la photosphère sous forme *d'ondes acoustiques*. En montant, ces ondes rencontrent des couches moins denses où leur amplitude augmente, de sorte qu'elles se transforment en *ondes de choc*. Les ondes de choc sont absorbées dans la chromosphère et la basse couronne et leur énergie se transforme en chaleur, d'où l'échauffement de l'enveloppe externe du Soleil. Ainsi la couronne serait chauffée par le « bruit » de la zone convective située sous la photosphère!

Cette théorie a été progressivement développée et raffinée au cours des années par de nombreux savants, mais il a fallu attendre 1961 pour qu'elle reçoive une confirmation expérimentale directe. Dès 1960, R. Leigthon avait observé au Mont Wilson des oscillations de la surface solaire : grâce à l'effet Doppler-Fizeau, on peut voir un point quelconque de la photosphère monter et descendre, comme soulevé par le passage d'une vague. A Sacra-

Types divers de protubérances →

On aperçoit, à l'extrême droite du cliché, une protubérance quiescente. A gauche, une protubérance active avec écoulement de matière selon des trajectoires imposées par un champ magnétique intense.

mento Peak, Evans et Michard ont pu obtenir des données beaucoup plus détaillées sur ces oscillations : il s'agit bien, semble-t-il, d'ondes qui se propagent à la vitesse du son (voisine, dans l'atmosphère solaire, de 6 km/s). Comme le prévoit la théorie, leur amplitude augmente avec l'altitude; dans la chromosphère, elles sont remplacées par des mouvements plus rapides et désordonnés (ondes de choc?). Les ondes sonores de la photosphère appartiennent à un registre trop « grave » pour être audibles, car leur période est comprise entre 3 et 5 minutes. L'énergie acoustique qui traverse la photosphère n'est que de 3 ou 4 watts/cm² (au lieu de 6 200 watts/cm² pour les ondes lumineuses), mais cet appoint est suffisant pour maintenir la température de la couronne. Une fois encore, le travail patient des observateurs est venu rejoindre les hypothèses les plus hardies des théoriciens.

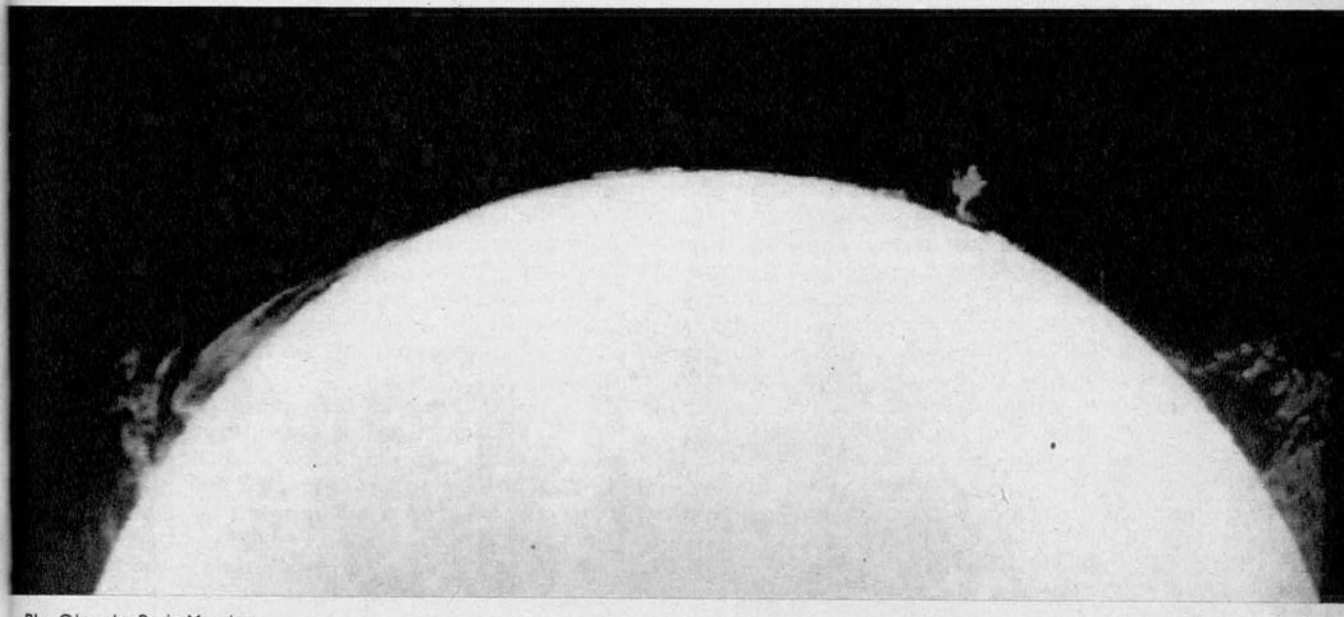
Les taches solaires

Les manifestations extrêmes de l'activité solaire sont assez rares, et pourtant la surface de l'astre porte, presque en permanence, quelques centres actifs dont le signe le plus évident est la présence de *taches*. Le nombre et aussi l'importance individuelle moyenne des centres actifs varie selon un cycle de période 10 à 11 ans. En 1954, année de minimum, on n'a vu que très peu de taches sur le Soleil, alors qu'elles ont été très nombreuses en 1957-1958. Pour 1964-1965, les spécialistes ont prévu l'organisation d'une Année Internationale du Soleil Calme !

Aux époques de maximum d'activité on voit naître sur le Soleil quelques dizaines de groupes de taches par mois. Certains, très petits, ne subsistent qu'un jour, d'autres durent deux ou trois mois et sont aussi les plus grands. Malgré leurs variétés de formes et de dimensions, les taches obéissent à des lois curieuses. D'abord elles n'apparaissent sur le Soleil que dans des zones particulières de latitude (par rapport à l'équateur du Soleil naturellement). Au début d'un cycle, les taches se forment à des latitudes de 30 à 35°, puis la région productive se déplace vers l'équateur, et en fin de cycle les dernières taches se forment très près de celui-ci, en même temps d'ailleurs que les premières taches du nouveau cycle naissent vers 35° de latitude, de sorte qu'il y a recouvrement partiel des cycles.

Les taches apparaissent normalement en groupes, une tache isolée étant généralement la survivante d'une paire ou d'un groupe plus nombreux, après disparition de ses compagnes. Ces groupes sont alignés dans la direction est-ouest, celle de la rotation du Soleil sur lui-même. Ainsi la tache ouest, qui précède le reste du groupe dans la rotation, est dite « tache de tête » : elle est généralement la plus grande et la plus durable.

En 1908, G.E. Hale fit, au Mont Wilson, une découverte sensationnelle. Le spectrographe lui montra que les raies du spectre des taches sont décomposées par l'effet Zeeman comme celles d'un gaz en présence d'un champ magnétique élevé. Un groupe de taches est semblable à un énorme aimant en-



Ph. Obs. de Paris-Meudon

foui dans le Soleil, dont seuls les deux pôles apparaîtraient, formant la tache de tête et la tache de queue. Lorsque celle-ci est un pôle magnétique nord, celle-là est un pôle sud. Mais ces polarités ne sont pas quelconques : au cours du cycle actuel, toutes les taches de tête dans l'hémisphère nord sont des pôles nord, les taches de queue des pôles sud; cette disposition s'inverse dans l'hémisphère sud du Soleil. Et elle s'inversera aussi au cycle undécennal suivant, où les taches de tête de l'hémisphère nord auront droit à la polarité sud.

Activité solaire et champs magnétiques

Quel prodigieux mécanisme régularise ainsi la disposition des champs magnétiques à la surface du Soleil et nous fait découvrir l'ordre dans le désordre apparent de la naissance des taches ?

Dans une grande tache dont le diamètre dépasse souvent celui de la Terre, le champ atteint fréquemment 2 000 ou 3 000 gauss (comparable au champ d'un puissant électro-aimant). C'est à cause du champ que la tache est plus froide de 1 000° que la photosphère voisine et semble noire par contraste. Pour expliquer ce phénomène, il faut faire appel à la *magnétohydrodynamique*, c'est-à-dire à la théorie de la mécanique des fluides conducteurs de l'électricité en présence de champs magnétiques. Cette théorie est fort complexe, mais nous pouvons en citer tout de même un résultat simple pour un gaz extrêmement conducteur tel que le plasma solaire (on appelle plasma un gaz composé d'atomes partiellement ionisés et contenant des ions et électrons libres) : les lignes de force du champ sont « gelées » dans la matière; celle-ci ne peut s'écouler transversalement au champ, mais seulement le long des lignes de force. De tels effets mécaniques du champ permettent de comprendre la plupart des phénomènes de l'activité solaire.

Autour de la région centrale noire des taches, appelée *ombre*, s'étend une *pénombre* plus brillante marquée de petites stries radiales. L'ensemble des taches d'un groupe est entouré d'une zone où la photosphère, et surtout la chromosphère, ont une structure anormale : il s'agit des *plages faculaires*, brillantes sur les spectrohéliogrammes usuels. La présence des plages montre que le centre d'activité s'étend souvent assez loin des taches. A toutes ces apparences optiques correspond une structure magnétique particulière : dans l'ombre des taches, le champ magnétique est très grand et les lignes de forces approximativement verticales; elles s'ouvrent en éventail vers les bords de l'ombre et se couchent horizontalement dans la pénombre. Dans la plage faculaire, les champs tombent à quelques dizaines de gauss seulement, mais couvrent une grande surface.

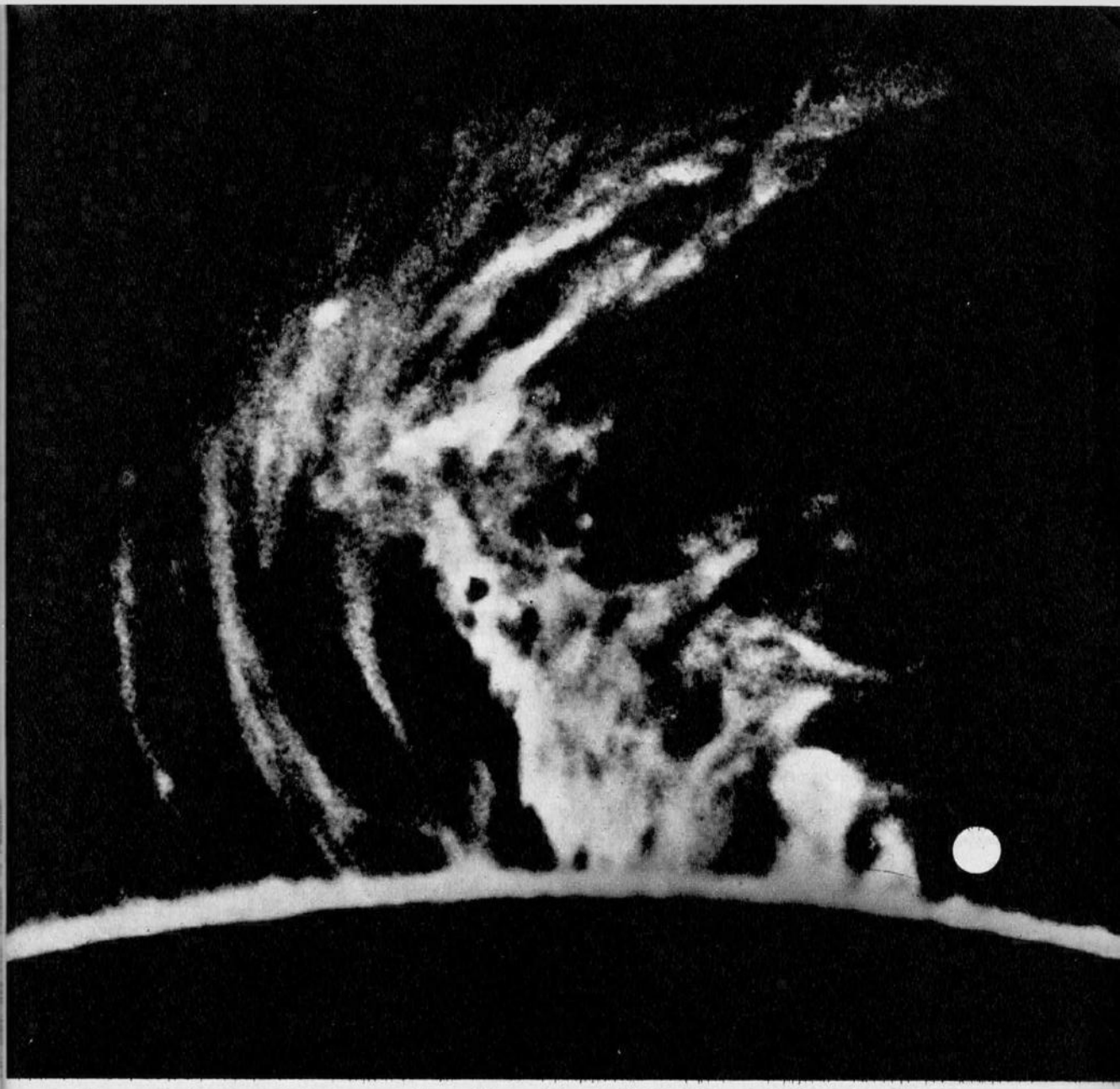
Apparence optique et structure magnétique des centres d'activité évoluent de concert : dans les centres jeunes, les plages sont compactes et brillantes, les taches serrées. Les régions de polarités opposées sont reliées par des tubes de force de très forte courbure. Puis les taches s'écartent et disparaissent, les plages faculaires se dispersent; le champ décroît tout en occupant une surface de plus en plus grande, et (pour autant qu'on le sache!) les lignes de force connectant les polarités opposées décrivent dans la couronne des arcs gigantesques.

La mesure directe des champs magnétiques n'est aisée qu'au niveau de la photosphère dont le spectre contient des raies fines très sensibles à l'effet Zeeman. Pour étudier le champ dans la couronne, l'astronome dispose cependant de remarquables « traceurs », les *protubérances*.

Protubérances quiescentes et protubérances actives

Ces belles formations apparaissent au bord du Soleil comme de vastes extensions de la chromosphère, aux formes et aux mouvements variés. Les spectrohéliogrammes nous les révèlent en projection sur le disque sous forme de filaments sombres. Dans la diversité géométrique de ces phénomènes, il faut au moins distinguer entre les protubérances « actives » et « quiescentes ». Celles-ci sont relativement stables et affectent la forme de lames de gaz tendues comme des draperies : leur longueur atteint couramment 300 000 km, leur hauteur 50 000 à 100 000, mais l'épaisseur est de l'ordre de 5 000 km. Les protubérances « actives » se développent seulement à l'intérieur des centres d'activité; elles sont plus petites, plus brillantes, toujours en évolution rapide. D'ailleurs les protubérances quiescentes peuvent être « activées » brusquement, et l'activation peut conduire à leur destruction complète par écoulement de leur matière vers les taches selon des trajectoires régulières, ou plus rarement par éjection dans l'espace.

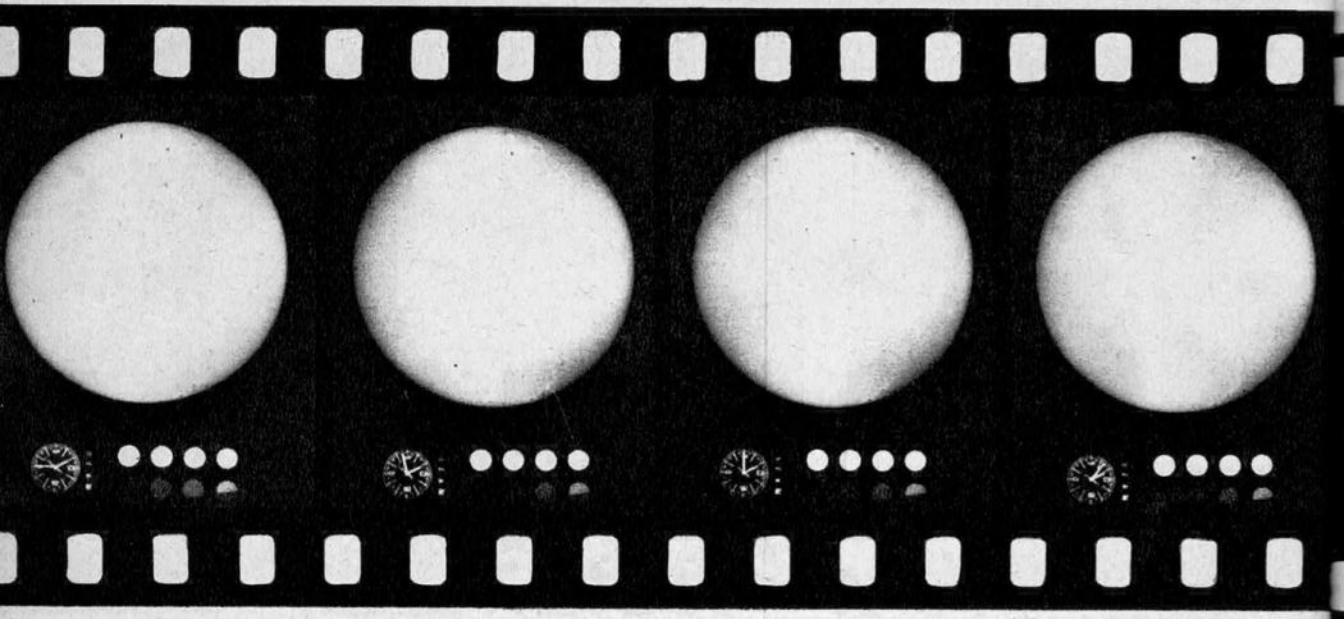
Il est certain que les mouvements, l'évolution et l'existence même des protubérances sont contrôlés par des forces électromagnétiques. Leurs spectres nous révèlent en effet que la température y est beaucoup plus basse et la densité du gaz plus grande que dans le milieu coronal qui les entoure. Aussi tomberaient-



Une grande protubérance active, s'étendant à 225 000 km d'altitude. Le disque blanc, aux dimensions de la Terre, n'a été ici dessiné que pour donner l'échelle.

elles comme des cailloux dans l'eau si elles n'étaient soutenues par quelque chose : cette force de soutien est probablement fournie par le champ magnétique dont on sait qu'il tend à interdire les mouvements perpendiculaires aux lignes de force. Les mouvements observés dans les protubérances s'effectuent donc sans doute le long des lignes de force, et les trajectoires observées dessinent celles-ci. Rien d'étonnant à ce que ces trajectoires semblent si souvent aboutir aux taches, puisque celles-ci sont les points où les faisceaux de lignes de force les plus importants émergent du Soleil ou y retournent.

Au cours de l'évolution des centres d'activité, c'est-à-dire au cours de la dilution progressive de leurs champs magnétiques, la région solaire perturbée recherche perpétuellement un état d'équilibre entre les différentes formes d'énergie présentes. Certaines situations correspondent à des équilibres instables dont la rupture fortuite entraîne le déchaînement de phénomènes d'allures catastrophiques, les *éruptions solaires*.



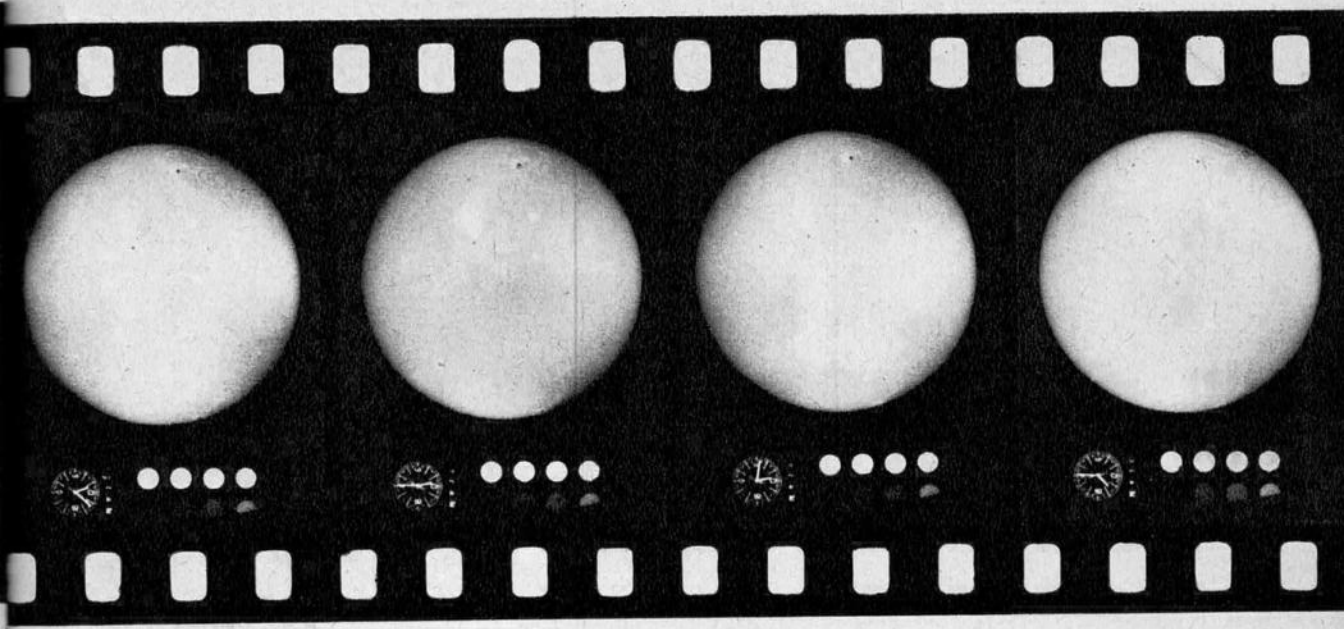
La grande éruption solaire du 12 juillet 1961, telle que l'a enregistrée l'héliographe qu la cadence d'une image par minute. La phase de croissance s'est inscrite sur les deu

Au point de vue optique, l'éruption est essentiellement un sursaut brusque d'éclat d'une zone limitée, contenue en général dans un centre d'activité jeune. Ce sursaut lumineux intéresse principalement la chromosphère solaire et n'est observable qu'avec les radiations émises dans cette couche. L'éruption simple comporte un point brillant qui parvient à son maximum d'éclat en moins de 5 minutes puis décroît plus lentement; mais on observe couramment des événements de forme et d'évolution très complexes.

Émissions radio, rayons X, « bulles » de plasma

A l'émission optique est associée fréquemment un ensemble d'émissions radioélectriques et une émission de rayons X dans la bande de 10 à 1 Å de longueur d'onde. Ces rayons X ont été observés directement par les fusées et par le satellite 1960 η 2. Ils augmentent brutalement l'ionisation de la haute atmosphère terrestre, provoquant un changement d'altitude et de densité ionique des couches de l'ionosphère sur lesquelles se réfléchissent normalement les ondes utilisées par les télécommunications : d'où perturbations de celles-ci par évanouissement du signal (« fade-out »). Quant aux divers sursauts radioélectriques détectés par les radiotélescopes au moment des éruptions, ils correspondent au passage dans la couronne de plusieurs types de perturbations : nuages de particules ionisées ou ondes de choc. Les nuages voyageront jusqu'à la Terre et y donneront, un ou deux jours après l'éruption, des orages magnétiques et des aurores polaires. (Une telle « bulle » de plasma solaire a été rencontrée par Pionnier V.)

Dans certains cas les nuages seront capturés par le champ magnétique des régions solaires voisines, et accélérés selon un mécanisme comparable à celui des accélérateurs de la physique nucléaire, tels que le synchrotron. Ce phénomène nous est révélé par une émission radiosolaire caractéristique, le sursaut de type IV. Les particules accélérées pourront éventuellement, au bout de quelques heures ou quelques jours, quitter le Soleil et parvenir jusqu'à la Terre où elles s'ajouteront au flux de rayons cosmiques qui nous arrive constamment de l'espace. Ces brèves remarques suffisent à expliquer pourquoi les éruptions solaires sont aussi importantes pour le géophysicien et l'astronaute que pour l'astronome. En particulier, les observations radio du Soleil permettront de prévoir l'arrivée sur Terre de ces rayons cosmiques qui constituent un danger grave pour les futurs voyages interplanétaires. Débrouiller les causes des éruptions solaires est un problème fort difficile. On rencontre cependant un fil conducteur très sûr en examinant la probabilité de production d'éruptions par les centres d'activité. Cette probabilité est sensiblement plus



équipe l'Observatoire de Haute-Provence. Ces images ont été extraites d'un film pris à xième, troisième et quatrième images à partir de la gauche et n'a duré que 10 minutes.

forte pour les groupes de taches jeunes, comportant des taches grandes et serrées et des champs magnétiques élevés. Mais plus encore que la grandeur du champ, c'est la complexité de la structure magnétique qui joue le rôle essentiel dans la productivité en éruptions. Les groupes complexes sont ceux où les zones de polarités opposées s'enchevêtrent, sans la séparation nette qui caractérise les groupes bipolaires : ils produisent presque dix fois plus d'éruptions que ces derniers.

Ainsi les éruptions semblent liées à l'instabilité de certains types de structures magnétiques. Les recherches entreprises pour comprendre quelles sont les structures instables n'ont pas encore donné de résultats décisifs. Il est probable qu'on assiste à une condensation brutale d'une petite portion de couronne solaire, par un mécanisme analogue à l'effet « de pincement » que l'on observe dans les décharges dans les gaz.

Cette condensation très brève est suivie, par réaction, d'une expansion brutale. Comme on l'a vu, celle-ci pourra être canalisée par les champs magnétiques ou, au contraire, elle se traduira par l'envoi de bouffées de gaz ionisés dans l'espace.

Le « vent solaire »

Bien qu'une éruption solaire libère sous forme de rayonnement, et très accessoirement par l'accélération de particules, une énergie de l'ordre de 10^{30} à 10^{32} ergs (soit plus d'un million de fois la production annuelle de l'E.D.F.), elle n'entame pas sérieusement, semble-t-il, l'énergie totale présente dans les centres actifs sous forme de champs magnétiques. Il semble que ceux-ci disparaissent par neutralisation réciproque des champs de deux régions voisines du Soleil. Cependant la présence du champ a aussi pour conséquence de produire un renforcement local de la densité et de la température de la couronne au-dessus des zones actives. De l'énergie est dépensée pour cela et le bilan en est finalement une légère perte de matière par le Soleil! En effet, la couronne est si chaude qu'une partie de ses atomes atteint, d'après la théorie cinétique des gaz, une vitesse suffisante pour qu'ils soient arrachés à l'attraction solaire. Ainsi la couronne s'évapore, phénomène que l'on désigne sous le joli nom de « vent solaire ». Cette évaporation est considérablement renforcée au-dessus des centres actifs.

Rassurons le lecteur qui pourrait s'inquiéter de voir « notre » Soleil perdre ainsi de sa substance. La perte de matière correspondant au vent solaire est dérisoire par rapport à la masse que l'astre perd sous forme de lumière (environ 4 millions de tonnes par seconde). Et même à ce rythme imposant notre Soleil peut briller encore pendant 10 milliards d'années.

R. MICHARD
Observatoire de Paris-Meudon

Ph. Obs. des Monts Wilson et Palomar

LES ÉTOILES

LE Soleil est une étoile comme les autres. Il nous paraît bien plus grand et bien plus lumineux parce qu'il est beaucoup plus près. Certaines étoiles ont un diamètre cent fois plus grand que le Soleil ou bien sont des milliers de fois plus lumineuses; à cause de leur énorme distance, nous les voyons comme des points, même dans les télescopes les plus puissants, et leur lumière est à peine perceptible ou tout à fait insensible à l'œil nu.

La distance des étoiles

On a vu, dans un chapitre précédent, que la méthode générale pour évaluer les distances est celle de la triangulation et que, si l'on tente de l'employer pour les étoiles, il faut, en raison de leur grand éloignement, faire des visées aux deux bouts d'un diamètre de l'orbite de la Terre, c'est-à-dire en deux points séparés par une distance d'environ 300 millions de km. On obtient ainsi la *parallaxe annuelle* d'une étoile, c'est-à-dire l'angle sous lequel un observateur situé sur l'étoile verrait le rayon moyen de l'orbite terrestre, supposé perpendiculaire au rayon visuel.

Cet angle est toujours très petit. Ainsi l'étoile la plus proche que l'on connaisse, Proxima du Centaure, voisine du pôle céleste sud et donc invisible dans nos régions, a une parallaxe annuelle de 0" 78. Voyons ce que cela signifie. On calcule aisément qu'une parallaxe d'une seconde d'arc correspondrait à une étoile située à une distance 206 265 fois plus grande que la distance de la Terre au Soleil, appelée « unité astronomique ». Pour une parallaxe de 0" 78, il faut diviser la valeur précédente par 0,78, ce qui donne 264 000 unités astronomiques. Rappelons que Pluton est à une distance inférieure à 50 unités astronomiques. On saisit tout de suite l'isolement dans l'espace du Soleil et de son petit système de planètes.

L'angle qui intervient est tellement petit que les tentatives de mesures ont échoué pendant longtemps. Les premiers succès datent de 1837. Jusque vers 1900, on n'a réussi à mesurer les parallaxes que pour une soixantaine d'étoiles, car les mesures, uniquement visuelles, étaient fort difficiles. Depuis le début du siècle, on préfère la méthode photographique, plus rapide et plus précise; elle consiste à prendre deux photographies d'une étoile et de la région voisine du ciel à six mois d'intervalle, puis à comparer la position de l'étoile par rapport à celles de plusieurs des étoiles voisines les plus faibles. On a déterminé ainsi les distances de plus de 3 000 étoiles.

Ces observations démontrent que, contrairement aux apparences, les étoiles ne sont pas toutes à la même distance de nous, comme elles le seraient si elles étaient attachées sur une véritable sphère céleste. Les étoiles d'une constellation, par exemple la Petite Ourse, ne sont pas situées sur une surface plane, ni sur une sphère. La figure d'une constellation est un effet de perspective, qui changerait totalement si on pouvait voir les étoiles d'un autre point de l'espace.

Nous avons vu aussi qu'une unité commode et imagée pour exprimer les distances des étoiles est l'*année-lumière*, définie comme la distance parcourue par la lumière en un an.

← La nébuleuse galactique du Crabe

Située dans la constellation du Taureau, cette nébuleuse a été photographiée en lumière rouge avec le télescope de 5 m du Mont Palomar. C'est le résidu de l'explosion d'une supernova qui s'est produite en 1054. Les gaz sont en expansion rapide à partir d'un point central à la vitesse de 1 120 km/s. La nébuleuse émet un intense rayonnement radioélectrique.

Ph. Obs. des Monts Wilson et Palomar.

Les quinze étoiles les plus proches

Nom de l'étoile	Distance en années-lumière	Mouvement propre annuel (en sec. d'arc)	Vitesse radiale en km/s	Magnitudes et spectres des composantes			Luminosité des composantes (Soleil = 1)		
α Centaure	4,27	3,68	— 25	0,3 G0	1,7 K5	11 M5	1,1	0,27	0,00006
Étoile de Barnard..	6,00	10,30	— 108	9,5 M5	×	—	0,0004	×	—
Wolf 359	7,70	4,84	+ 13	13,5 M6	—	—	0,00002	—	—
Luyten 726-8	7,90	3,35	+ 29	12,5 M6	10,0 M6	—	0,00005	0,00003	—
Lalande 21185	8,18	4,78	— 86	7,5 M2	×	—	0,005	—	—
Sirius	8,70	1,32	— 8	— 1,6 A0	7,1 (Naine bl)	—	25	0,008	—
Ross 154	9,29	0,67	— 4	10,6 M5	—	—	0,0004	—	—
Ross 248	10,3	1,58	— 81	12,2 M6	—	—	0,0001	—	—
ε Eridan	10,8	0,97	+ 15	3,8 K2	—	—	0,28	—	—
Ross 128	10,9	1,40	— 13	11,1 M5	—	—	0,0003	—	—
61 Cygne	11,1	5,22	— 64	5,6 K6	6,3 M0	×	0,06	0,03	×
Luyten 789-6	11,2	3,27	— 60	12,2 M6	—	—	0,001	—	—
Procyon	11,3	1,25	— 3	0,5 F5	10,8 (Naine bl)	—	6,3	0,0005	—
ε Oiseau Indien ...	11,4	4,67	— 40	4,7 K5	—	—	0,13	—	—
Σ 2398	11,6	2,29	+ 1	8,9M4	9,7 M4	—	0,003	0,001	—

La vitesse radiale est comptée positivement quand la source s'éloigne de l'observateur. Le signe X indique la présence d'un compagnon non encore vu dans les lunettes.

La vitesse de la lumière dans le vide étant très sensiblement de 300 000 km/s, une année-lumière vaut presque 10 000 milliards de km.

L'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, est à une distance de 4,3 années-lumière. Elle forme un système multiple avec l'étoile Alpha du Centaure, qui est, elle-même, une étoile triple et qui a été considérée jusqu'en 1915 comme l'étoile la plus proche. Une trentaine d'étoiles se trouvent dans une sphère ayant un rayon de 15 années-lumière; la plupart sont invisibles à l'œil nu, car elles sont très peu lumineuses.

On arrive à mesurer les distances des étoiles les plus proches avec une erreur relative inférieure à 1 %. Mais l'incertitude est déjà de 50 % lorsque les distances atteignent 300 années-lumière. Au delà, les mesures trigonométriques perdent toute signification et les astronomes ont imaginé des méthodes indirectes, déjà évoquées précédemment et dont nous reparlerons plus loin.

Températures et spectres

Certaines étoiles nous paraissent nettement bleues, d'autres rougeâtres. La couleur dépend de la température superficielle, car l'intensité relative des diverses radiations émises varie avec cette température. L'étude de la répartition de l'énergie dans le spectre d'une étoile permet d'évaluer la température de sa surface. Les valeurs trouvées vont de 2 500° K pour les étoiles rouges à 50 000° K pour les étoiles bleues (la lettre K désigne les températures absolues, c'est-à-dire comptées à partir du zéro absolu, — 273 °C).

La variation de la température superficielle s'accompagne d'un changement en nombre, en position et en intensité, des raies sombres qui sillonnent les spectres continus des étoiles, comme celui du Soleil. Ces raies sont dues à l'absorption de la lumière, pour certaines radiations, par les atomes ou les molécules présents dans les couches gazeuses enveloppant l'étoile. Certains spectres stellaires contiennent à peine quelques raies, d'autres en sont couverts ; les uns sont dominés par les raies de certains éléments, tandis que dans d'autres ces raies sont à peine visibles ou absentes.

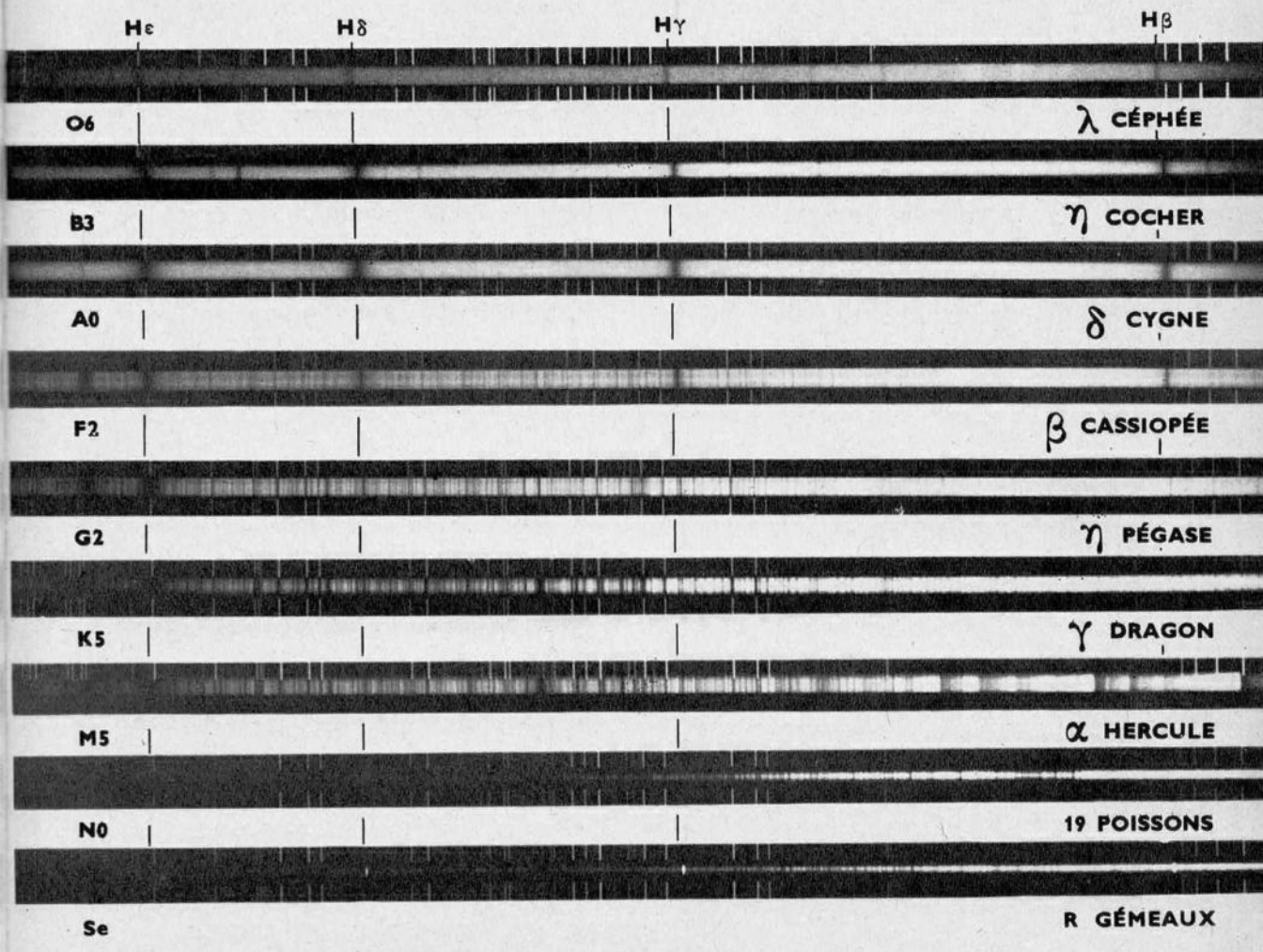
Bien avant de connaître le mécanisme de la formation des raies sombres, les astronomes ont établi une classification des étoiles d'après leurs spectres, classification empirique, dans laquelle on s'est arrangé pour obtenir une variation graduelle de l'intensité des raies. Dans

Les types de spectres d'étoiles →

Les spectres stellaires sont les bandes striées de raies d'absorption sombres, encadrées par un spectre d'étalonnage formé par les raies d'émission du fer. Les courtes longueurs d'onde (vers l'ultraviolet) se trouvent à gauche. Les raies d'absorption à l'aplomb de Hβ, Hγ, etc., sont celles de l'hydrogène (série de Balmer). Établie empiriquement d'après l'intensité des raies, cette classification, dite de Harvard, est en fait une classification d'après la température superficielle des étoiles, celles des premières classes étant les plus chaudes (classes O de l'ordre de 50 000°, classe G 6 000°, et classes M à S 3 000°).

Les vingt étoiles les plus brillantes

Nom	Distance en années-lumière	Mouvement propre annuel (en sec. d'arc)	Magnitudes et spectres des composantes			Luminosité des composantes (Soleil = 1)		
Sirius (α Grand Chien)	8,7	1,32	−1,6 A0	7,1 (Naine bl)	—	25	0,08	—
Canope (αCarène)	180	0,02	−0,9 F0	—	—	5 800	—	—
α Centaure	4,27	3,68	+0,3 G0	1,7 K5	11 M5	1,1	0,32	0,00006
Véga (α Lyre)	26,5	0,35	0,1 A0	—	—	53		
Capella (α Cocher)	46	0,44	0,2 G0	10,0 M1	13,7 M5	130	0,016	0,0005
Arcturus (α Bouvier)	36	2,29	0,2 K0	—	—	83	—	—
Rigel (β Orion)	650	0,01	0,3 B8	—	—	25 000	—	—
Procyon (α Petit Chien)	11,3	1,25	0,5 F5	10,8 (Naine bl)	—	6,3	0,0005	—
Achernar (α Eridan)	140	0,09	0,6 B5	—	—	910	—	—
β Centaure	200	0,04	0,9 B1	—	—	1 450	—	—
Altaïr (α Aigle)	16,5	0,66	0,9 A5	—	—	9,1	—	—
Bételgeuse (α Orion)	650	0,03	0,9 M2 (variable)	—	—	14 500	—	—
α Croix du Sud	218	0,05	1,4 B1	1,9 B1	—	1 000	630	—
Aldébaran (α Taureau)	68	0,20	1,1 K5	13 M2	—	130	0,002	—
Pollux (β Gémeaux)	36	0,62	1,2 K0	—	—	33	—	—
Spica (α Vierge)	160	0,05	1,2 B2	—	—	640	—	—
Antarès (α Scorpion)	170	0,03	1,2 M1	5,2 B4	—	760	19	—
Fomalhaut (α Poisson Austral)	23	0,37	1,3 A3	—	—	12	—	—
Deneb (α Cygne)	540	0,60	1,3 A2	—	—	7 000	—	—
Régulus (α Lion)	85	0,24	1,3 B8	7,6 K2	13	160	0,5	0,003



la classification de Harvard, il y a dix classes, qui sont désignées arbitrairement par des lettres majuscules, à savoir, dans l'ordre, O, B, A, F, G, K, M, R et N, S. Il y a, de plus, dans les classes, des subdivisions, que l'on exprime par des chiffres, de 0 à 9. Par exemple, le Soleil appartient à la classe G 2, qui correspond à une température superficielle de 6 000° K; les raies d'absorption les plus intenses dans son spectre sont celles des métaux, tandis que les raies de l'hydrogène sont relativement faibles.

On a d'abord cru que l'intensité relative des raies dépend de l'abondance des éléments et qu'il y avait des étoiles à hydrogène ou des étoiles à métaux. On sait maintenant que les variations des spectres indiquent des variations de température et, à un degré moindre, des variations de pression. La raison en est que, par exemple, les raies de l'hydrogène ne sont intenses que lorsque les atomes d'hydrogène sont portés dans des conditions physiques telles qu'ils produisent une forte absorption; ce résultat n'est atteint que lorsque la température est suffisamment élevée. Quant aux abondances relatives des divers éléments, il semble que l'on trouve sensiblement les mêmes dans la grande majorité des étoiles, le Soleil compris. Il existe quelques écarts; on connaît, en particulier, des étoiles riches en hélium et pauvres en hydrogène.

Naines et géantes

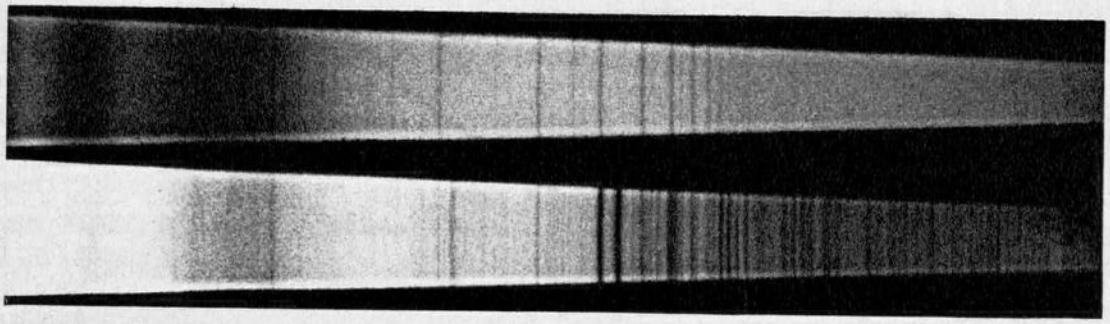
Quand on a déterminé la distance d'une étoile, on déduit, d'après son éclat apparent, sa luminosité intrinsèque. Il existe quelques étoiles qui sont un million de fois plus lumineuses que le Soleil. Ce dernier est, lui-même, un million de fois plus lumineux que les étoiles les plus faibles que l'on connaisse.

La luminosité d'une étoile dépend évidemment de sa température superficielle et de sa surface. D'après sa luminosité et sa température, les lois de la physique permettent de calculer son rayon. On trouve que les dimensions varient beaucoup, qu'il y a des étoiles naines et d'autres qui sont géantes. La plus petite étoile connue a sensiblemen. les dimensions de la Lune. Quelques étoiles « supergéantes » sont au moins cent fois plus grosses que le Soleil.

Comme on le voit, on trouve donc, parmi les étoiles, une très grande diversité de luminosités, de dimensions, de températures superficielles. Mais ces paramètres ne varient pas au hasard. C'est ce que montre la figure page 99, bien connue des astronomes et qu'ils désignent sous le nom de *diagramme de Russell*, du nom de l'astronome américain qui a eu le premier l'idée de cette représentation. Elle fait apparaître comment la luminosité des étoiles varie en fonction de leur température superficielle (ou de leur couleur, ou encore de leur classe spectrale). A chaque étoile on fait correspondre un point. On constate que la majorité des points se placent sur une bande étroite, qui traverse la figure en diagonale et à laquelle on donne le nom de « branche princi-

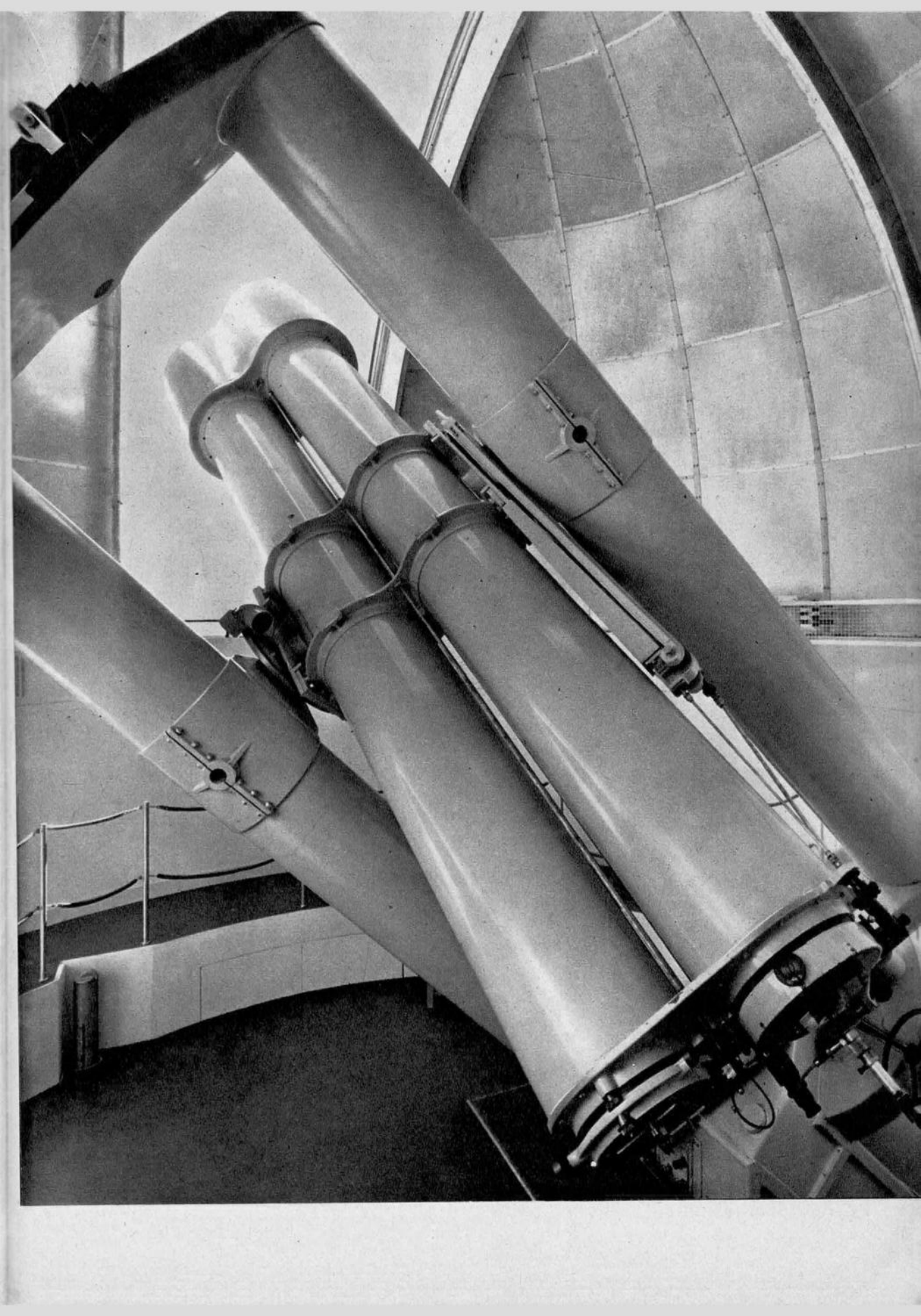
Le grand prisme-objectif de l'Observatoire de Haute-Provence →

C'est un type de spectrographe très lumineux dans lequel la fente et le collimateur sont supprimés. Un grand prisme, de petit angle est interposé directement devant l'objectif d'une lunette astronomique. On obtient ainsi, simultanément, dans le plan focal, le spectre de toutes les étoiles du champ.

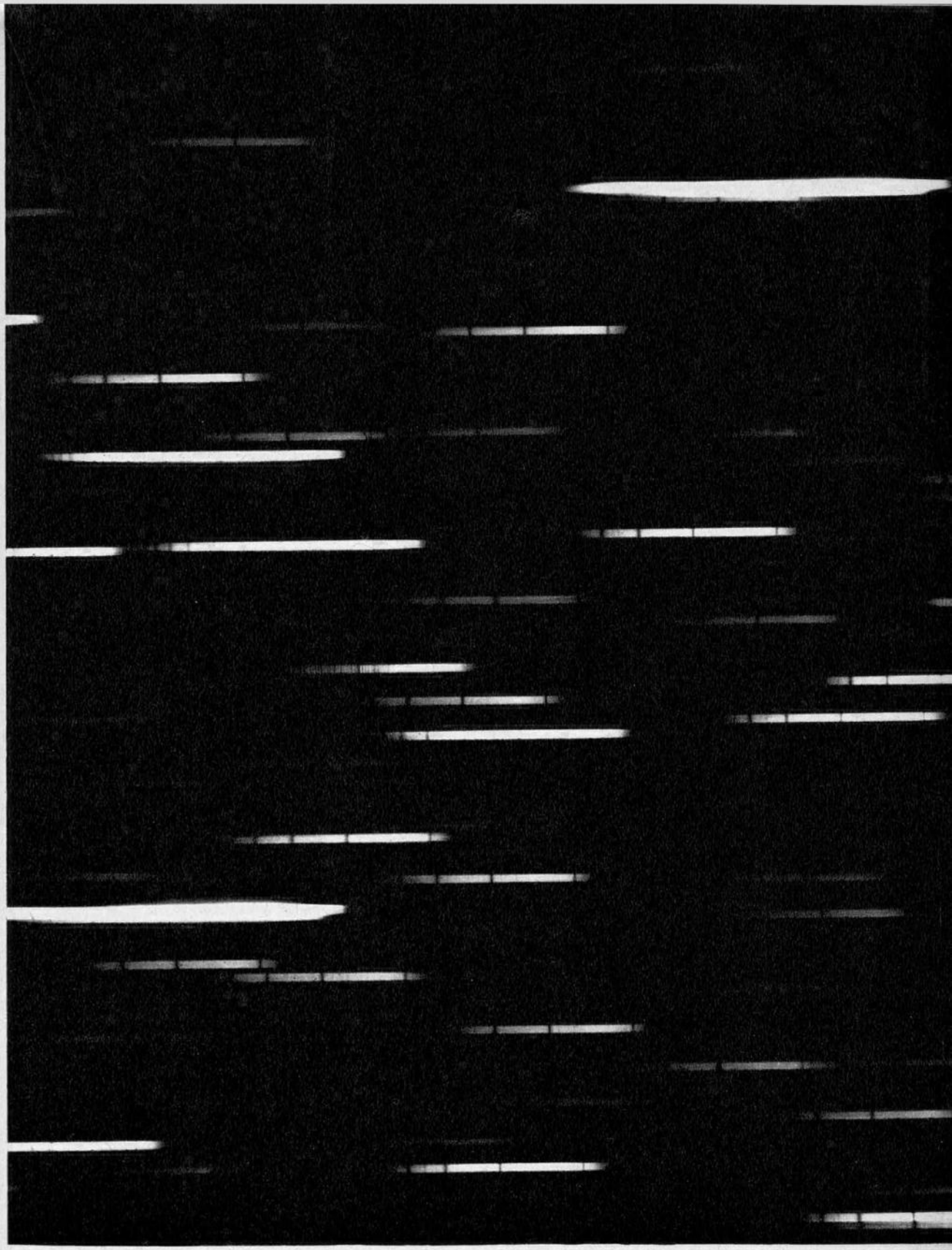


CES DEUX SPECTRES D'ÉTOILES à petite dispersion ont été obtenus en 4 minutes de pose à l'observatoire de Haute-Provence (clichés D. Chalonge et P. Guerin). Le rouge est à gauche et l'ultraviolet à droite. En haut, spectre d'une étoile chaude (10 Lézard); en bas, spectre d'une étoile plus froide, du type solaire (η Cassiopée A). Le maximum du rayonnement de l'étoile chaude se situe dans le violet et l'ultraviolet, celui de l'étoile plus froide dans le jaune. Remarquer les raies métalliques nombreuses dans le spectre de cette dernière. Les principales raies communes sont les raies de l'hydrogène.

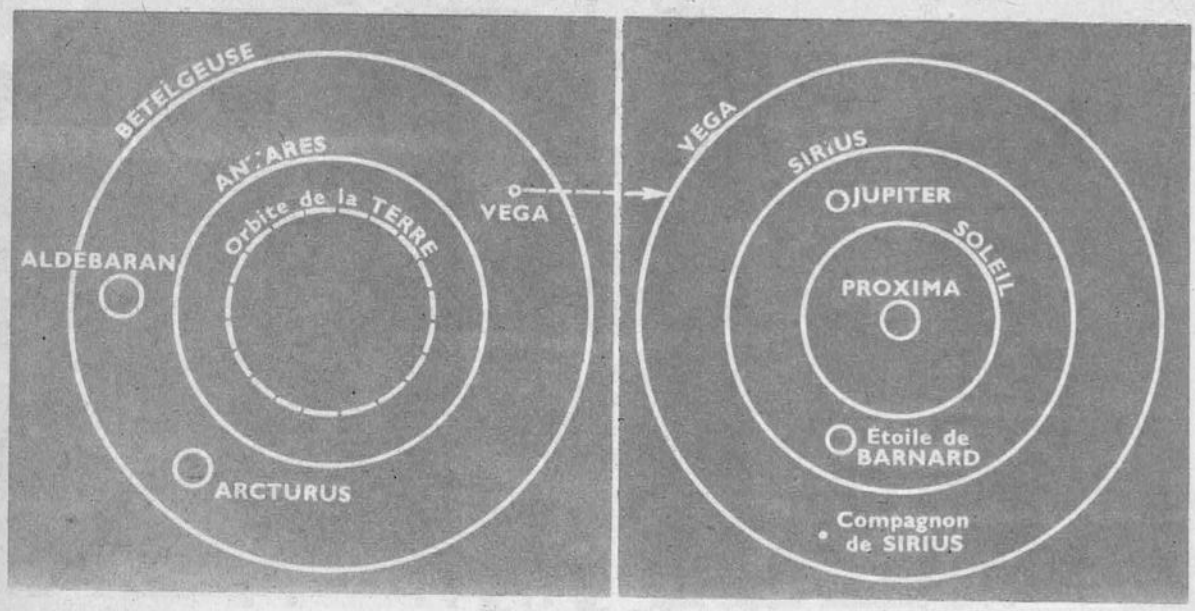
Cl. Observatoire de Haute-Provence, C.N.R.S.



La même région du ciel a été photographiée à l'observatoire de Haute-Provence, à gauche dans le champ est dispersée par le prisme et fournit un spectre sur la plaque. Une partie



avec la lunette simple, à droite avec le prisme-objectif. La lumière de chaque étoile placée seulement du cliché original a été agrandie; on pouvait y relever une centaine de spectres.



Les dimensions comparées des étoiles ; étoiles naines et géantes.

Quelques étoiles de diamètre relativement modeste sont représentées à droite où figure aussi Jupiter à titre de comparaison. A cette échelle, le Compagnon de Sirius est représenté par un point car cette naine blanche très dense a un diamètre qui ne dépasse pas quatre fois celui de la Terre. Sur le croquis de gauche figurent quelques étoiles géantes dont on peut estimer les dimensions énormes d'après celle de l'orbite de la Terre.

pale ». Elle va des étoiles géantes bleues aux naines rouges.

Un nombre relativement faible d'étoiles se situent au voisinage d'une deuxième branche presque horizontale, pour laquelle, donc, la luminosité est sensiblement la même entre les classes F et M. Cette branche rejoint la première vers le point qui correspond à l'étoile Sirius, de la classe A o. Puisque ces étoiles sont plus lumineuses que celles de même classe de la série principale, on leur donne le nom de géantes, tandis que les étoiles de la série principale, du moins celles des classes F à M, sont souvent appelées, par opposition, les naines. Le Soleil, qui appartient à la branche principale et se trouve à peu près au milieu du diagramme, doit être considéré comme une étoile jaune naine. L'étoile Capella, qui est de la même classe que le Soleil, mais sur la branche des géantes, est cent fois plus lumineuse que lui. L'écart entre géantes et naines est surtout marqué pour les étoiles de faible température; par exemple, le rapport des luminosités entre les étoiles naines M o et les géantes rouges de la même classe atteint un million.

Quelques étoiles ont des caractères qui ne correspondent ni à la branche principale, ni à celle des géantes. Ce sont, d'une part, des étoiles qui sont nettement plus lumineuses encore que les géantes (50 à 100 fois) et auxquelles on donne le nom de *supergéantes* (exemple : Antarès ou alpha Scorpion, de la classe M); et, d'autre part, les astres que l'on appelle les *naines blanches*, sur lesquelles nous reviendrons et dont la propriété la plus singulière est d'avoir une densité moyenne bien supérieure à celle des corps les plus denses que nous connaissons, puisqu'elle dépasse largement 1 000 fois celle de l'eau.

Les étoiles naines, jaunes et rouges, sont de beaucoup les plus nombreuses; mais les géantes sont bien plus lumineuses que les naines et forment la majorité des étoiles visibles à l'œil nu.

On peut estimer la luminosité d'une étoile d'après sa position dans le diagramme de Russell, c'est-à-dire, finalement, d'après son spectre. En comparant ensuite la luminosité de l'étoile à son éclat apparent, on a une méthode pour évaluer la distance. C'est la méthode qui est le plus souvent utilisée pour les étoiles dont la distance dépasse 300 années-lumière.

La seule difficulté est de distinguer si l'étoile appartient à la série principale, ou si c'est une géante ou une supergéante. Le spectre est sensiblement le même dans les

trois cas, mais, si l'étoile est géante, certaines raies d'absorption se trouvent renforcées et servent de critère de luminosité. Cette différence s'explique aisément : l'atmosphère d'une étoile géante est beaucoup plus étendue, donc beaucoup moins dense, que celle d'une étoile de la série principale.

Les mouvements des étoiles

Par opposition aux planètes, que nous voyons changer de position, on parle souvent des « étoiles fixes », car, à l'œil nu, les étoiles paraissent garder leurs positions relatives sur la sphère céleste. En réalité, elles ont toutes des mouvements relatifs rapides, avec des vitesses comparables à celles des planètes. Mais, à cause des distances énormes qui les séparent de nous, leurs déplacements angulaires sont faibles. Ils peuvent devenir notables pour de longs intervalles de temps; ainsi on a reconnu que les quatre étoiles brillantes Sirius, Bételgeuse, Aldébaran et Arcturus se sont éloignées des positions indiquées par Ptolémée d'une quantité comparable au diamètre apparent de la Lune.

L'étude du mouvement d'une étoile comporte deux mesures tout à fait indépendantes l'une de l'autre : celle du déplacement apparent de l'étoile sur la sphère céleste et celle de la vitesse radiale.

Si en un intervalle de quelques années la position apparente d'une étoile sur la sphère céleste a varié, ce « mouvement propre », comme l'appellent les astronomes, est décelé en comparant des photographies à grande échelle prises au début et à la fin de l'intervalle. On l'exprime en secondes d'arc, ou fraction de seconde par an.

Quant à la vitesse radiale, rappelons que l'on désigne ainsi la projection de la vitesse sur le rayon visuel. Elle produit un déplacement des raies du spectre vers les courtes ou les grandes longueurs d'onde selon que l'étoile se rapproche ou s'éloigne de l'observateur (indépendant de la distance de l'étoile)

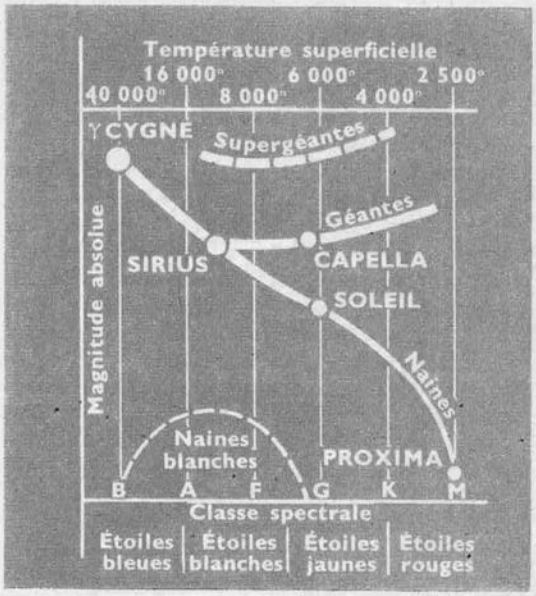
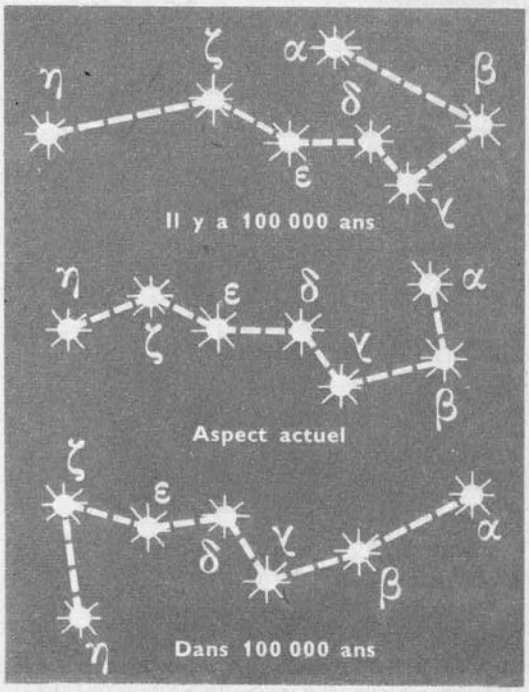


Diagramme de Hertzsprung-Russell

On l'obtient en portant en abscisse la température superficielle d'une étoile et en ordonnée sa luminosité. Les points se groupent d'une manière remarquable sur deux lignes, l'une en diagonale correspondant à la séquence principale ou classe des étoiles ordinaires ou naines, l'autre légèrement remontante où s'inscrivent les géantes, 100 fois plus brillantes que le Soleil. On trouve plus haut les supergéantes et en bas, à gauche, le groupe des naines blanches.

L'aspect de la Grande Ourse au cours des millénaires →

Le mouvement propre des étoiles entraîne une déformation de la forme des constellations qui évoluent très lentement. La Grande Ourse, en particulier a changé d'aspect depuis 100 000 ans et en présentera un tout différent dans 100 000 ans. Mais on remarque que les cinq étoiles centrales ont conservé sensiblement leurs positions relatives; leurs mouvements propres sont à peu près parallèles, ce qui indique qu'il s'agit d'un même courant d'étoiles.



et elle est évaluée d'après ce déplacement (effet Doppler).

C'est parmi les étoiles proches que l'on trouve les plus grands mouvements propres. Le record observé est celui de *l'étoile de Barnard*, pour laquelle il atteint 10" 2 par an. La distance de l'étoile est de 6 années-lumière et sa vitesse linéaire est de 90 km/s. En 180 ans, le déplacement de l'étoile sur la sphère céleste est égal au diamètre apparent de la Lune. Si toutes les étoiles avaient des mouvements propres aussi grands et répartis au hasard, la forme des constellations se modifierait d'une manière sensible au cours de la vie d'un homme. Mais ce n'est pas le cas. On ne connaît guère que 50 étoiles dont le mouvement propre dépasse 2" par an et 1 200 pour lesquelles il soit supérieur à 0" 5 par an.

Puisque le Soleil est une étoile, il est probable qu'il est lui-même en mouvement comme les autres étoiles. On ne peut le définir que par rapport à un repère supposé fixe, repère qui n'est évidemment pas absolu.

Comme il est normal, on a d'abord étudié le mouvement du Soleil par rapport aux étoiles voisines. Les étoiles dont la distance ne dépasse pas 3 000 années-lumière forment un essaim, et l'on a trouvé qu'à l'intérieur de cet essaim le Soleil se déplace, à la vitesse de 20 km/s, vers un point qui se trouve près de l'étoile μ de la constellation d'Hercule.

Mais nous parlerons plus loin de la rotation de la Galaxie et nous verrons que tout l'essaim des étoiles voisines du Soleil se trouve, lui-même, emporté par ce gigantesque mouvement.

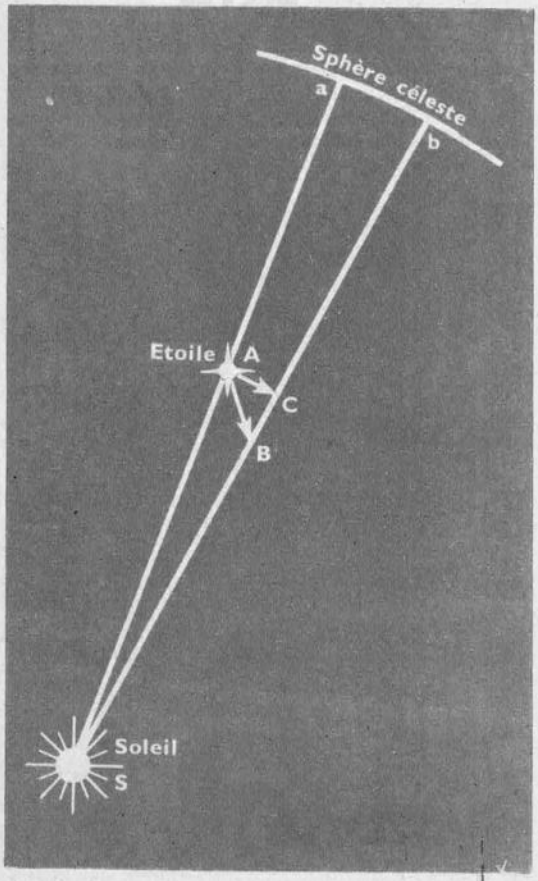
Étoiles doubles ou multiples

Une étoile double est formée, comme son nom l'indique, par un système de deux étoiles, que la lunette montre très proches l'une de l'autre.

Il s'agit parfois seulement d'un *couple optique*, c'est-à-dire d'un ensemble de deux étoiles qui paraissent rapprochées par un effet de perspective; ces couples n'offrent pas d'intérêt particulier. Dans la majorité des cas, les deux étoiles sont réellement voisines dans l'espace et forment un véritable *système physique*; elles sont attachées l'une à l'autre par la force d'attraction de Newton, comme le sont la Terre et la Lune ou le Soleil et les planètes.

Le nombre des étoiles doubles est très grand. Parmi les étoiles dont la distance ne dépasse pas 35 années-lumière, on en compte environ 50 %. On connaît aussi des systèmes formés de 3, 4, 5 et même 6 étoiles, qui tournent les unes autour des autres.

Les deux composantes d'une étoile double tournent autour de leur centre de gravité commun, suivant les lois de la gravitation. On étudie ce mouvement par des mesures répétées de la distance apparente des deux étoiles et de la direction de la ligne qui les joint sur la sphère céleste. Dans la plupart des cas, il faut de nombreuses années pour reconnaître la nature du mouvement et déterminer les éléments de l'orbite. Le mouvement est généralement très lent; les périodes de révolution sont de plusieurs années, souvent supérieures à 100 ans. Quand on dispose d'un assez grand nombre d'observations, on trace l'orbite apparente d'une composante autour de l'autre; puis, par des méthodes que nous n'ex-



← Étude du mouvement d'une étoile

L'étude du mouvement d'une étoile, ici A, comporte deux mesures : celle de son mouvement propre, l'angle aSb que font ses positions apparentes sur la sphère céleste vues du Soleil, que l'on évalue en secondes d'arc par an ; celle de sa vitesse radiale C B déduite du déplacement des raies de son spectre.

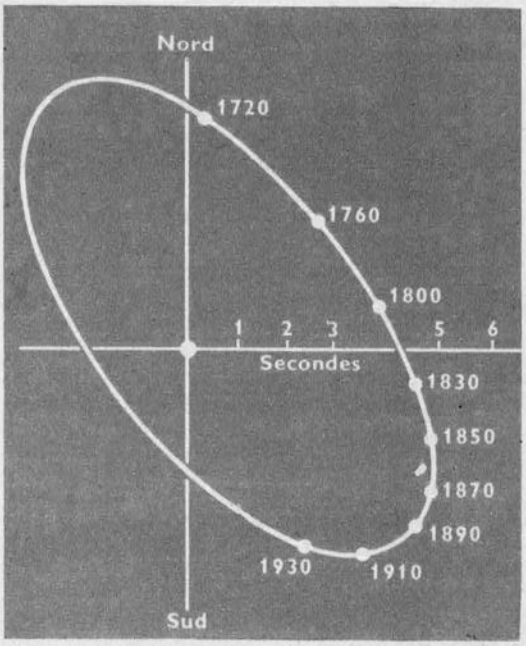
poserons pas ici, on passe à l'orbite réelle. Deux cents étoiles doubles environ ont été étudiées jusqu'ici avec une précision satisfaisante. Quelques orbites sont presque circulaires; le plus souvent, elles sont très allongées. Quand on connaît la distance de l'étoile, on peut calculer la longueur du demi-grand axe de l'ellipse; on trouve fréquemment des valeurs comparables aux distances des dernières planètes externes du système solaire.

Quand les deux composantes peuvent être vues et étudiées comme nous venons de le dire, on dit que l'on a une *étoile double visuelle*. Il existe probablement aussi un grand nombre d'étoiles doubles trop serrées, dont les lunettes ne peuvent pas séparer les composantes. La preuve qu'il en est ainsi nous est fournie par la découverte des *étoiles doubles spectroscopiques*, dont le caractère nous est révélé par l'analyse spectrale, qui montre la superposition de deux spectres distincts. Ces deux spectres sont décalés, en règle générale, l'un par rapport à l'autre, car à certains moments une composante s'approche de nous et plus tard s'éloigne de nous (effet Doppler). On étudie le mouvement en traçant la courbe de vitesse, dans laquelle on porte en abscisses le temps et en ordonnées la vitesse radiale, déduite du déplacement des raies. Quand la courbe des vitesses est une sinusoïde, l'orbite est un cercle; pour une orbite elliptique, la forme de la courbe de vitesse n'est plus symétrique et permet de déterminer les éléments de l'orbite.

Un autre cas est celui des *étoiles doubles à éclipses* : à certains moments, une des composantes cache l'autre, parce que le plan de l'orbite se présente de profil, ou presque. L'exemple le plus connu est celui de l'étoile Algol (β Persée) dont les variations lumineuses ont été découvertes en 1873, mais dont le nom, qui signifie « le démon », paraît indiquer que ces variations étaient connues depuis longtemps par les Arabes.

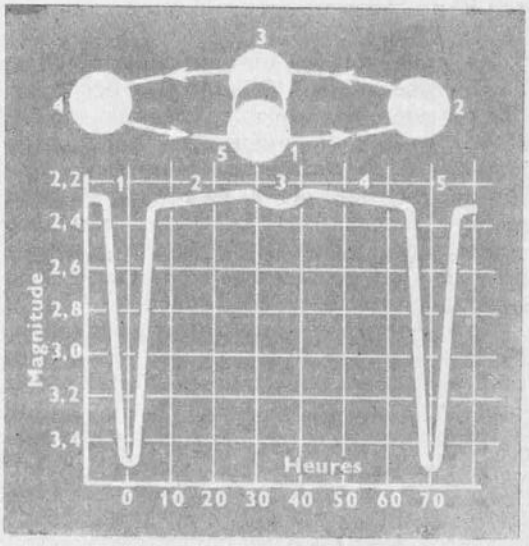
On connaît maintenant plusieurs centaines d'étoiles doubles à éclipses. Dans de nombreux cas, la luminosité continue à varier en dehors des moments correspondant aux éclipses, probablement parce que les étoiles n'ont pas une forme sphérique, mais sont déformées en ellipsoïdes sous l'effet de la force d'attraction qu'elles exercent l'une sur l'autre.

La mise en évidence du compagnon de Sirius mérite un examen tout particulier. On avait remarqué que l'étoile Sirius n'a pas un mouvement propre uniforme, en ligne droite, mais décrit une ligne très légèrement sinueuse, avec une périodicité de 50 ans. On en avait déduit que Sirius était probablement une étoile double et devait posséder un com-



Orbite du Compagnon de Castor

Castor est α des Gémeaux. L'étoile apparaît double dans la plus petite lunette. La période de rotation du compagnon est de 380 ans. L'observation au spectrographe montre que chaque composante est elle-même une binaire spectroscopique. Là où l'œil nu ne voit qu'une étoile, il y en a en réalité quatre.



Une étoile double à éclipse

L'étoile Algol (β Persei) est une étoile à éclipse dont le plan orbital est vu presque de profil. Le passage du disque d'une étoile devant l'autre explique la courbe lumineuse caractéristique d'un tel ensemble.

pagnon invisible. Bien qu'il soit 300 fois moins lumineux que Sirius, ce compagnon a été vu dans une lunette pour la première fois en 1862. C'est son attraction sur Sirius A qui produit le mouvement sinusoïdal observé. Sirius B est la première naine blanche qui ait été découverte.

Pendant longtemps, on n'a pas soupçonné que la proportion des étoiles doubles puisse être aussi importante. Les idées sur leur origine ont beaucoup évolué. On ne croit plus, comme on l'avait imaginé, qu'une étoile puisse se diviser à cause de son mouvement de rotation trop rapide; il semble que les étoiles multiples ont pour origine plusieurs condensations se formant dans un nuage de gaz et de poussières interstellaires en rotation.

La masse des étoiles

Quand une étoile est éloignée des autres, on ne peut pas déterminer sa masse, car on n'a aucun moyen d'apprécier l'attraction qu'elle exerce. Les étoiles doubles permettent, entre autres intérêts, d'évaluer les masses des composantes. Si l'on connaît la valeur du grand axe de l'orbite, l'application d'une des lois de Newton donne la somme des masses des deux composantes. Si, de plus, on a mesuré le mouvement du couple par rapport aux étoiles voisines, on obtient une autre relation entre les masses et, par suite, les valeurs de chacune d'elles. En fait, cette méthode directe n'est applicable qu'à un petit nombre d'étoiles, 500 environ.

En examinant les résultats ainsi obtenus, l'astronome anglais Eddington a découvert une propriété remarquable : la luminosité des étoiles varie régulièrement en fonction de leur masse. La courbe tracée représente une formule théorique établie en admettant que la matière formant les étoiles se comporte comme un gaz parfait (c'est-à-dire qui obéit aux lois dites de Mariotte et de Gay-Lussac sur la compressibilité et la dilatation).

Cette hypothèse surprenante avait été adoptée par Eddington dans le cas des étoiles géantes rouges, pour lesquelles elle semble légitime à cause de la très faible densité moyenne de ces astres. Mais ce fut une surprise de constater que la relation s'applique indistinctement à toutes les étoiles, naines ou géantes, à l'exception des naines blanches, même à celles qui ont une densité moyenne supérieure à celle de l'eau. Il faut en conclure que l'hypothèse d'Eddington est vraie aussi pour les étoiles denses, ce qui semble tout à fait extraordinaire. Nous verrons plus loin l'explication de cette propriété, due aux très hautes températures à l'intérieur des étoiles.

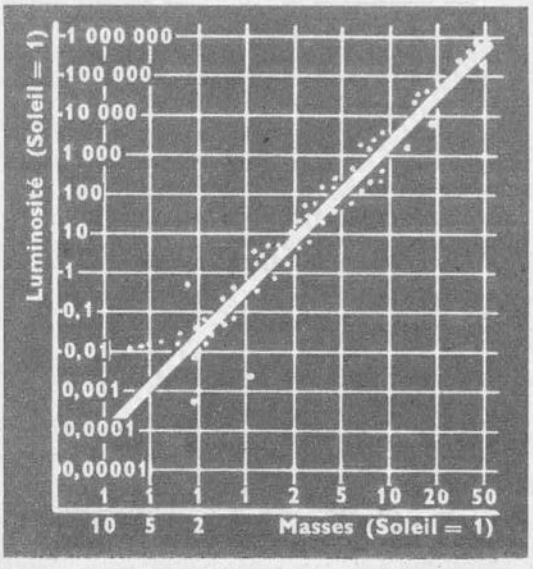
La relation entre la masse et la luminosité est donc pratiquement indépendante de la température superficielle ou du spectre de l'étoile. Ainsi, lorsque deux étoiles ont la même luminosité, elles ont sensiblement la même masse, même si leurs types spectraux sont différents. En rapprochant la relation en question et le diagramme de Russell, qui lie la luminosité à la température, on voit immédiatement que les étoiles géantes ont une grande masse, tandis que la masse décroît régulièrement quand on passe, dans la branche principale, des étoiles bleues aux étoiles rouges.

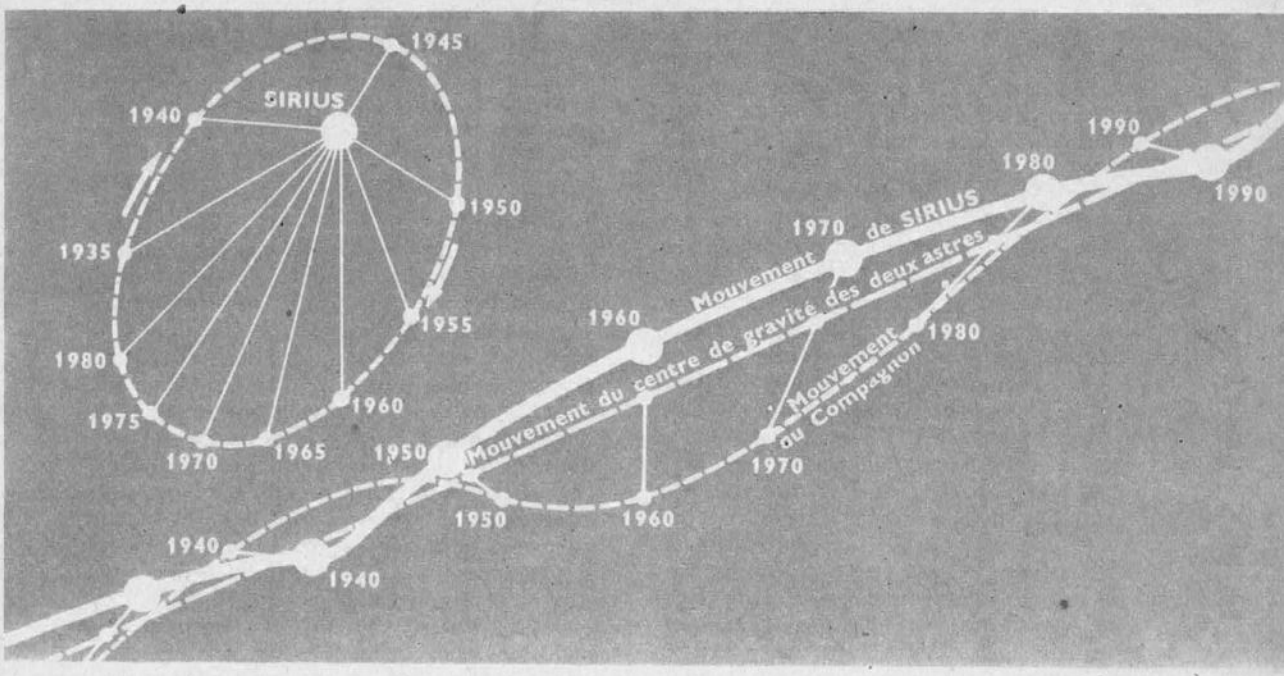
Sirius et son Compagnon →

L'observation a révélé que le mouvement propre de Sirius ne s'effectue pas suivant une ligne droite, d'un mouvement uniforme, mais est grossièrement sinusoïdal, avec une période de 50 ans. Il est représenté ci-dessus en trait plein. C'est que Sirius est une étoile double, dont l'étoile principale Sirius A, la plus lumineuse, et son Compagnon, Sirius B (une naine blanche), effectuent leurs révolutions autour de leur centre de gravité commun qui, lui, se déplace en ligne droite. On a tracé aussi l'orbite relative du compagnon autour de Sirius A, parcourue en 50 ans.

La relation masse-luminosité →

Les étoiles les moins massives sont les moins lumineuses, les plus massives sont les plus lumineuses. Si l'on porte en abscisses les masses et en ordonnées les luminosités, les étoiles se placent sensiblement sur une ligne droite. Celles qui s'en écartent vers le bas sont des étoiles anormales, des naines blanches.





On a constaté que la relation d'Eddington s'applique à tous les couples d'étoiles doubles, dont on a déterminé les masses par les méthodes décrites ci-dessus. Les astronomes généralisent et admettent que cette relation est vraie pour toutes les étoiles — à l'exception toujours des naines blanches — et évaluent ainsi la masse de la plupart des étoiles.

Cette évaluation montre que la grande majorité des étoiles ont une masse du même ordre de grandeur que le Soleil, pour préciser, comprise entre 1/10 et 10 fois la masse du Soleil. Il en résulte que les étoiles géantes rouges, ayant un très grand volume, ont une densité moyenne très faible. Par exemple, la densité moyenne de l'étoile Antarès (α Scorpion) est 20 000 fois plus petite que la densité de l'air ordinaire; une telle densité correspond à ce que l'on considèrerait, au laboratoire, déjà comme un « bon vide ». Les plus fortes densités, qui atteignent probablement un million de fois celle de l'eau, sont celles des naines blanches (qui, rappelons-le, n'obéissent pas à la relation entre la masse et la luminosité).

Les étoiles variables

Beaucoup d'étoiles ont un éclat variable et ne sont pourtant pas des étoiles doubles à éclipses. On en connaît plusieurs dizaines de milliers. Il est vraisemblable que toutes les étoiles présentent des variations de luminosité, mais que leur variation de magnitude est inférieure à 0,002, limite de précision des mesures actuelles. (A la variation de 0,002 de la magnitude correspond une variation de 0,2 % de la luminosité.)

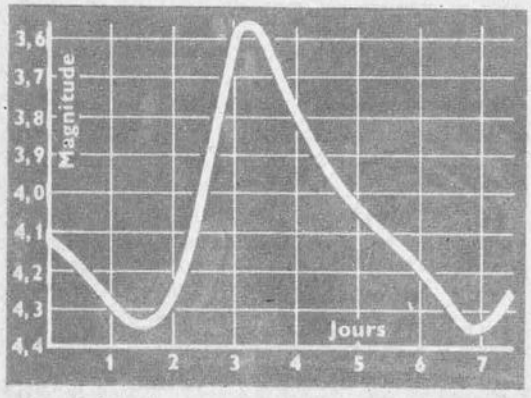
Les causes physiques de ces variations d'éclat ne sont pas toujours bien élucidées, mais elles sont connues pour plusieurs groupes.

Mettons à part les « novae », dont nous parlerons plus loin. Une faible proportion d'étoiles variables présentent des variations irrégulières; mais le plus souvent les variations sont périodiques. Si l'on classe ces étoiles d'après leurs périodes, on constate qu'elles se séparent assez nettement en trois groupes, pour lesquels la période a une valeur voisine d'un demi-jour (on connaît une étoile dont la période est seulement de 79 minutes), de 6 jours et de 280 jours. Celles du premier groupe sont appelées *variables des amas*, parce qu'elles sont particulièrement nombreuses dans les amas globulaires d'étoiles. Au deuxième groupe on a donné le nom de *Céphéides*, d'après celui de l'étoile type δ Céphée. Quant au troisième groupe, qui est le plus nombreux, c'est celui des *variables à longue période*. Dans l'ensemble, les étoiles variables sont des géantes, bien plus lumineuses que le Soleil. Mais la plupart sont très éloignées.

Les variables des amas et les Céphéides sont remarquables par la ponctuelle régularité de leurs variations lumineuses. La variation est de l'ordre d'une magnitude, ce qui signifie que

la luminosité est multipliée par 2,5 environ pour les variables des amas et un peu moins pour les Céphéides. Les variables des amas sont toutes invisibles à l'œil nu et appartiennent aux classes spectrales A ou F; les Céphéides sont plus brillantes et leurs classes spectrales sont en général F ou G. Toutes les étoiles de ces deux groupes qui ont été étudiées au spectrographe montrent un déplacement périodique des raies du spectre, lié aux variations d'éclat, qui fait penser aux étoiles doubles spectroscopiques. Cette interprétation est la première qui soit venue à l'idée, mais elle conduit, entre autres absurdités, à une orbite si petite que le « compagnon » supposé devrait se trouver à l'intérieur de l'étoile principale. On a reconnu maintenant qu'il s'agit d'*étoiles pulsantes*, c'est-à-dire d'étoiles qui subissent des expansions et des contractions périodiques. Le déplacement des raies du spectre correspond à un mouvement, non pas de l'étoile même, mais seulement de sa surface. La variation du rayon de l'étoile est relativement faible, de l'ordre de 7 à 8 %. Mais l'expansion et la contraction sont accompagnées d'une variation de la température et, par suite, de l'intensité lumineuse.

Les variables des amas et les Céphéides sont précieuses pour la détermination des distances. Les premières ont toutes sensiblement la même luminosité, cent fois environ celle du Soleil. Quant aux Céphéides, on a établi que leur éclat moyen varie très régulièrement en fonction de leur période : celles qui ont une période de 5 jours sont 380 fois plus lumineuses que le Soleil, une période de 10 jours correspond à une luminosité de 600 et une période de 30 jours à une luminosité de 1 200. Si dans un amas lointain d'étoiles, dont on ne



UNE CÉPHÉIDE a une courbe de lumière très régulière et qui se reproduit identiquement, ici avec une période de 5,37 jours. Il s'agit d'une étoile pulsante qui se dilate et se contracte périodiquement en changeant aussi de température et de spectre.

Nébulosité autour d'une nova →

Il s'agit ici de la nova N Persei dont l'explosion, en 1901, a engendré autour d'elle une véritable nébuleuse dont les gaz sont en très rapide expansion à partir de l'étoile, à une vitesse voisine de 1 200 km/s.

peut pas évaluer la distance par les méthodes habituelles, on décèle une Céphéide, on détermine sa période par mesure de ses variations lumineuses. D'après la relation indiquée, on déduit la luminosité moyenne de l'étoile, puis, d'après sa magnitude, la distance de l'amas.

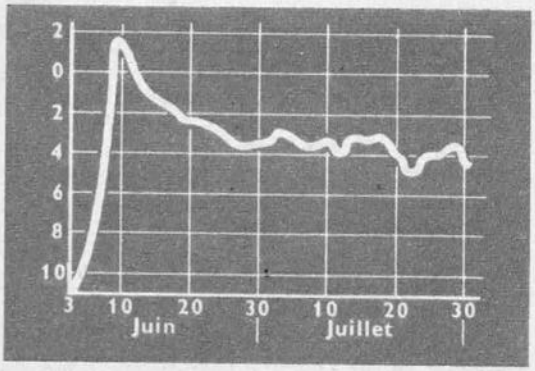
Les variables à longue période sont des géantes rouges, principalement de la classe spectrale M. Une des plus connues est Mira Ceti (c'est-à-dire La Merveilleuse de la constellation de la Baleine), dont la période vaut, en moyenne, 330 jours, mais peut varier entre 320 et 370 jours. De même, les éclats maximum et minimum changent légèrement d'une période à l'autre. On retrouve des caractères analogues chez beaucoup de variables de ce type. Entre un maximum et un minimum, la différence est beaucoup plus marquée que dans le cas des Céphéides. Pour Mira Ceti, l'intensité lumineuse varie dans le rapport de 1 à 250 environ. La cause de la variation d'éclat est moins bien connue que dans les cas précédents. Une pulsation se produit probablement, au moins dans les couches externes de l'étoile, mais il semble qu'elle déclenche des phénomènes atmosphériques complexes, plus ou moins irréguliers. On a reconnu récemment que Mira Ceti est elle-même une étoile double; son compagnon est une étoile bleue variable, dont la période propre des fluctuations est de 14 ans.

Les novae et les supernovae

L'exemple le plus spectaculaire de variations d'éclat est celui des *novae* ou étoiles nouvelles, ainsi nommées parce que l'on a cru autrefois qu'il s'agissait d'étoiles nouvellement formées. Il semble que l'étoile explose; en quelques heures, sa luminosité devient des milliers de fois plus grande; puis elle diminue graduellement et irrégulièrement; en quelques mois ou quelques années, elle revient à sa valeur initiale. Au moment de l'explosion, il se produit une violente expulsion de matière, avec des vitesses de l'ordre de 1 000 km/s. Cette matière forme autour de l'étoile une enveloppe gazeuse en expansion, que l'on observe ultérieurement.

Prenons un exemple qui a été bien étudié, celui de Nova Aquilae 1918 (c'est-à-dire la nova apparue dans la constellation de l'Aigle

en 1918). La nova, qui brilla au mois de juin 1918, était, avant son explosion, une étoile faible, de magnitude 10 ou 11, qui montrait de petites variations irrégulières d'intensité. En l'espace de 5 jours, son éclat devint 60 000 fois plus grand; l'étoile était alors la plus brillante de l'hémisphère nord. Puis elle commença très vite à diminuer et, vers la fin de l'année, la magnitude tomba à 6. Maintenant l'étoile est redevenue aussi faible qu'autrefois. Six mois environ après le maximum d'éclat, on a aperçu, dans les lunettes, une pâle enveloppe verdâtre autour de l'étoile. Depuis

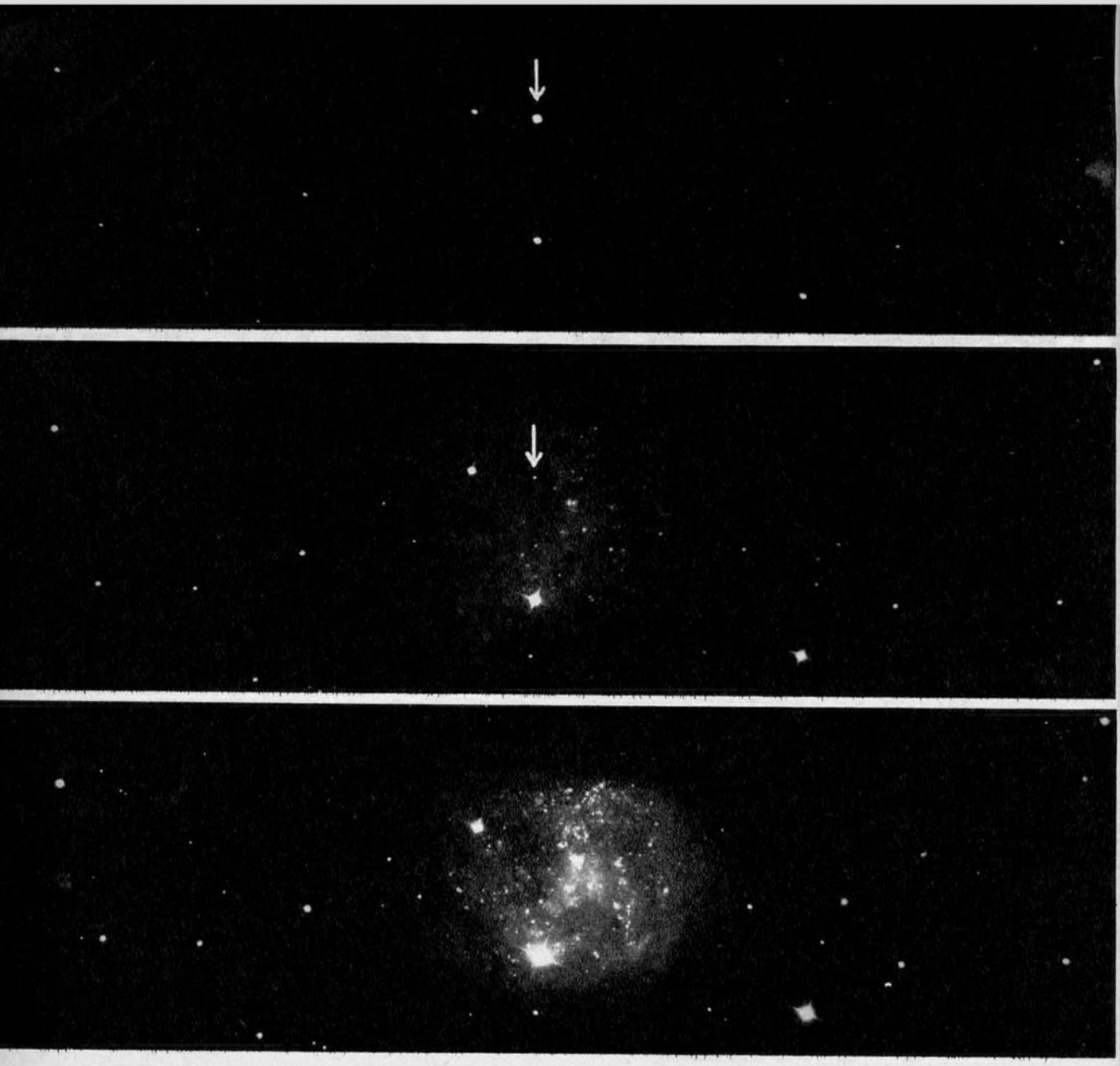


LA COURBE DE LUMIÈRE d'une nova. Il s'agit de Nova Aquilae, une étoile faible dont la magnitude a augmenté brusquement de 13 en moins de cinq jours en 1918. L'étoile, revenue maintenant à sa magnitude initiale, s'est entourée de gaz en expansion.

lors, on a trouvé que cette enveloppe a augmenté graduellement de volume, en devenant moins lumineuse; son diamètre a cru d'environ 2 secondes d'arc par an. D'après ce déplacement angulaire, on a pu, puisque l'observation du spectre avait donné la vitesse radiale d'expansion, déduire que la distance de l'étoile est d'environ 1 200 années-lumière. Souvent l'enveloppe en expansion autour d'une nova n'est pas symétrique et montre, par sa forme, une expulsion de gaz plus violente dans une certaine direction.

Cette expulsion de matière par les novae est confirmée par les variations spectrales, qui accompagnent toujours l'émission de lumière, bien qu'il n'y ait pas deux novae qui se comportent exactement de la même manière. Juste avant son maximum d'éclat, Nova Aquilae 1918 avait un spectre du type A, mais dont les raies d'absorption étaient fortement déplacées vers le violet. Ce déplacement doit être interprété, par l'effet Doppler, comme dû à un rapide mouvement vers l'avant des couches absorbantes de gaz situées de notre côté. Immédiatement après le maximum d'éclat, le spectre changea brusquement : des raies d'émission, très larges, se montrèrent à côté des raies d'absorption et le déplacement de ces dernières indiquait une vitesse d'approche de 2 000 km/s : en même temps, l'intensité du spectre continu avait nettement diminué.

L'explosion d'une nova est une formidable catastrophe, d'une échelle dépassant largement tout ce dont les hommes peuvent être



témoins sur la Terre. Et pourtant il se produit parfois des explosions plus importantes encore; on les appelle des *supernovae*. On les a observées dans des galaxies éloignées. Au maximum, leur luminosité atteint des millions de fois celle du Soleil.

La « nébuleuse du Crabe », dans la constellation du Taureau, est le résidu de l'explosion d'une supernova observée en 1054 dans notre Galaxie par les astronomes chinois et japonais. Elle apparaît sous forme d'une enveloppe de filaments en expansion. A l'intérieur de cette enveloppe, des électrons de grande énergie se déplacent dans un champ magnétique et donnent une intense émission radio sur ondes métriques. La nébuleuse du Crabe est aussi une source de rayonnement cosmique. La plupart des radiosources qui émettent sur ondes métriques (rayonnement non thermique) sont des restes de supernovae.

On pense que le phénomène de nova est dû à un déséquilibre et un rajustement des couches superficielles d'une étoile vieille, tandis que, pour une supernova, la perturbation concerne les couches profondes. Une supernova rejette dans l'espace une fraction appréciable de la masse totale de l'étoile, peut-être un dixième.

Les explosions des novae et des supernovae sont liées à l'évolution de certaines étoiles. On connaît quelques novae qui sont récurrentes, leurs explosions se répètent à

← Trois phases de l'explosion d'une supernova découverte en 1937

Ces photographies au télescope de 2,50 m du Mont Wilson intéressent la même région du ciel. Celle du haut montre, avec une pose de 20 minutes, la supernova à son maximum d'éclat. le 23 août 1937. Déjà, le 24 novembre 1938, la supernova apparaît beaucoup plus faible, bien que le deuxième cliché ait été pris avec une pose de 45 minutes. Sur le troisième en 1942, 85 minutes de pose ne la révèlent plus.

quelques années d'intervalle, par exemple T Coronae Borealis en 1866 et 1946, R S Ophiuchi en 1898, 1933, 1958.

L'intérieur des étoiles

Pouvons-nous savoir ce qui se passe à l'intérieur des étoiles ? La lumière que nous recevons provient des couches superficielles et l'analyse de cette lumière nous permet seulement de connaître les conditions physiques régnant dans ces couches externes et leur composition. Mais la matière stellaire jouit de propriétés relativement simples, très différentes des propriétés que nous observons dans les conditions habituelles. Elle les doit à la température très élevée et à la pression très forte qui existent à l'intérieur des étoiles.

Rappelons que les atomes sont formés d'un noyau, chargé positivement, entouré d'électrons, qui sont les grains élémentaires d'électricité négative. Les atomes sont très petits (diamètre de l'ordre de 10^{-8} cm), mais les noyaux des atomes le sont beaucoup plus encore; suivant une comparaison empruntée à l'astronomie, un noyau n'occupe guère plus de place dans un atome que le Soleil dans un volume d'espace comprenant le système solaire jusqu'à l'orbite de Neptune. Les électrons ne sont pas indissolublement liés aux noyaux des atomes; diverses actions, par exemple les chocs, peuvent arracher ces électrons. C'est en cet arrachement que consiste *l'ionisation.*

La matière stellaire

Déjà certains atomes sont ionisés dans les atmosphères des étoiles comme le montre l'analyse de leurs spectres. A l'intérieur des étoiles, la température, qui croît très rapidement vers le centre, communique aux atomes des mouvements désordonnés très rapides; d'autre part, la grande pression serre les atomes les uns contre les autres, les chocs des atomes entre eux sont donc nombreux et violents; ils provoquent une ionisation presque complète, tous les atomes perdant presque totalement leurs électrons.

On comprend alors une première propriété de la matière stellaire : elle se comporte comme un gaz, même lorsque sa densité est égale ou supérieure à celle de l'eau. En effet, un gaz ordinaire, non ionisé, approche de l'état liquide lorsque, par compression, les atomes sont amenés à se toucher, c'est-à-dire lorsque le volume du gaz est à peine supérieur au volume occupé réellement par les atomes ou les molécules. Dans la matière stellaire, très fortement ou complètement ionisée, l'espace réel des atomes dénudés est très petit par rapport aux conditions habituelles; cette matière doit donc être compressible jusqu'à des densités bien supérieures à celles des liquides ou des solides ordinaires et avoir encore les propriétés d'un gaz.

Densité et pression

Par l'effet de l'ionisation, la matière stellaire jouit d'une autre propriété, aussi surprenante que la première : bien que les noyaux des atomes conservent leur identité et soient donc différents les uns des autres, la matière stellaire a une densité à peu près indépendante de sa composition. La masse atomique moyenne d'un gaz ionisé est, en effet, voisine de 2, quel que soit l'élément dont on considère l'ionisation. Prenons, par exemple, le cas du fer, dont la masse atomique est 56 et dont l'atome ordinaire est formé d'un noyau et de 26 électrons; par ionisation complète il donne 27 particules, dont la masse atomique moyenne est $56/27 = 2{,}1$. Seuls l'hydrogène et l'hélium donnent, par ionisation, des valeurs plus faibles; leur influence est partiellement compensée par le défaut d'ionisation complète des éléments lourds, mais ces derniers sont très rares; en pratique ce sont les proportions relatives d'hydrogène et d'hélium qui déterminent la masse atomique moyenne de la matière stellaire.

D'autre part, dans l'équilibre interne des étoiles intervient la *pression de radiation*, ou pression exercée par la lumière sur les corps qu'elle rencontre. D'ordinaire cette pression est très petite; pourtant c'est elle qui dirige les queues des comètes à l'opposé du Soleil. C'est elle aussi qui, sur le Soleil, supporte la matière de la chromosphère, malgré les forces de gravité. Mais son influence devient énorme à l'intérieur des étoiles, car tandis que la pression ordinaire d'un gaz est proportionnelle à la température absolue, elle croît comme la puissance 4 de cette température. Elle contribue ainsi, pour une part d'autant plus grande que l'on considère des points plus près du

centre des étoiles, à supporter le poids des couches gazeuses externes.

Finalement, les théoriciens sont parvenus à calculer la température, la pression et la densité au centre des étoiles et la variation de ces quantités depuis le bord. On obtient, au centre du Soleil, une température de l'ordre de 20 millions de degrés, une densité de 80 fois celle de l'eau et une pression de 100 milliards de kg/cm². La température centrale est du même ordre de grandeur (15 à 30 millions de degrés) pour toutes les étoiles appartenant à la branche principale.

Les naines blanches

Nous avons déjà parlé à plusieurs reprises des naines blanches, et nous avons cité comme exemple le compagnon de Sirius. Ces étoiles étranges ont une masse comparable à celle du Soleil, alors que leur volume est plutôt celui d'une planète. Il en résulte que leur densité moyenne atteint une valeur énorme, 100 000 fois celle de l'eau dans le cas de Sirius B. Il semble que dans certains cas la densité puisse atteindre la valeur d'une tonne par centimètre cube. La gravité à la surface de ces corps est également très forte, 10 000 à un million de fois celle que nous subissons.

La matière hyperdense qui constitue les naines blanches est formée de noyaux atomiques et d'électrons étroitement serrés les uns contre les autres. On a affaire à un état particulier de la matière, auquel on donne le nom de *matière dégénérée*, très différente de la matière stellaire ordinaire, dont nous avons parlé plus haut. On a pu expliquer les propriétés inattendues de cette matière en appliquant aux particules qui la constituent une analyse statistique spéciale, découverte par la mécanique quantique. Quand la pression devient très grande, les électrons ont un comportement particulier, qui fait que la pression devient indépendante de la température et croît très vite avec la densité. Ainsi, au centre des naines blanches, la pression est à peu près 100 millions de fois plus forte qu'au centre du Soleil, tandis que la densité est seulement un million de fois plus grande. On comprend comment les naines blanches ne s'effondrent pas sous leur propre poids.

Malgré leur nom, certains de ces astres sont bleus et d'autres jaunes. Jusqu'ici on n'en a guère identifié que 200 et une douzaine ont été étudiés en détail. La raison de cet état de chose est la faible luminosité des naines blanches (100 à 10 000 fois plus petite que celle du Soleil), et non leur rareté. A cause de leur petite intensité lumineuse, nous observons seulement celles qui sont proches de nous. Or parmi les 200 étoiles les plus proches, il y a au moins 7 naines blanches, contre 7 étoiles des types A et F et une géante (Pollux).

Origine de l'énergie

Le Soleil et les étoiles répandent continuellement dans l'espace un flux énorme d'énergie.

Quelle est la source de cette énergie ? C'est une question que l'on s'est posée depuis déjà longtemps. Il n'est pas possible qu'elle provienne de réactions chimiques; on évalue, par exemple, que si le Soleil était formé uniquement de charbon et s'il brûlait dans une atmosphère d'oxygène, il serait consumé en quelques milliers d'années. On a cherché si la chute des météorites sur le Soleil ne pourrait pas fournir assez d'énergie pour maintenir son rayonnement; mais cette idée a été rapidement abandonnée. Il y a environ cent ans, on a cru trouver l'explication avec l'hypothèse de la contraction : le Soleil doit se contracter vers son centre par l'effet de l'attraction de gravitation; le travail de contraction doit se retrouver sous forme de chaleur, produite par la compression des masses gazeuses. Mais on a facilement calculé qu'une telle contraction ne suffirait à fournir au Soleil l'énergie qu'il rayonne que pendant un temps de 20 millions d'années, en gros. Ce n'est pas une période suffisante, puisque les évaluations de l'âge de la Terre conduisent à une valeur de 5 milliards d'années environ. Il a donc fallu chercher une autre source pour l'énergie.

Réactions nucléaires spontanées

On a reconnu maintenant que l'énergie du Soleil et des étoiles provient de réactions nucléaires, c'est-à-dire de réactions de transmutation qui se produisent spontanément à leur intérieur. On sait provoquer de telles réactions au laboratoire, notamment en lançant les uns contre les autres des atomes ou des noyaux d'atomes par des dispositifs appropriés. Au sein des étoiles, ce sont les mouvements frénétiques d'agitation thermique qui projettent les noyaux atomiques les uns vers les autres. Ces noyaux sont chargés d'électricité positive et, par suite, se repoussent mutuellement. Les théories physiques modernes montrent que les températures de quelques millions de degrés, qui règnent au centre des étoiles, sont précisément celles qui sont nécessaires pour donner aux corpuscules l'énergie suffisante pour vaincre les forces de répulsion. Ainsi les réactions nucléaires se réalisent toutes seules à l'intérieur des étoiles et libèrent une énergie des milliers de fois plus grande que dans le cas des réactions chimiques.

Elles s'accompagnent, en effet, de variations de masses relativement importantes. Or l'énergie libérée par une réaction est proportionnelle à cette variation de masse, et le coefficient de proportionnalité est énorme, puisque, d'après la théorie de la relativité, il y a équivalence de la masse et de l'énergie, de sorte qu'un gramme correspond à 25 millions de kWh.

Seules, d'ailleurs, un petit nombre de réactions nucléaires peuvent s'amorcer à l'intérieur des étoiles; ce sont les réactions de combinaison des protons ou noyaux d'hydrogène avec les noyaux des éléments légers. On a même pu préciser les réactions qui se produisent au sein des étoiles les plus nombreuses, celles appartenant à la branche principale du diagramme de Russell.

Le cycle proton-proton et le cycle du carbone

Deux séries de réactions sont possibles. La première est appelée le *cycle proton-proton*. Les réactions en jeu sont analogues à celles qui interviennent dans les bombes à hydrogène. Leur résultat final est la combinaison de quatre noyaux d'hydrogène, qui se trouvent unis pour former un noyau d'hélium. C'est à cette même transformation qu'aboutit le *cycle du carbone*, série de six réactions dans lesquelles les noyaux d'hydrogène, en se combinant successivement à des noyaux de carbone et d'azote, se trouvent convertis en noyaux d'hélium, tandis que les noyaux de carbone et d'azote jouent un rôle analogue à celui des catalyseurs dans les réactions chimiques ordinaires et sont régénérés.

La discussion sur l'importance relative des deux cycles de réaction a donné lieu à de nombreuses études. On a maintenant la conviction que le premier cycle est celui qui intervient dans les étoiles les plus froides. Le deuxième cycle n'entre en jeu que lorsque la température est assez élevée, mais son rendement devient tout de suite prépondérant. Le Soleil est voisin du point de démarcation et pour lui les deux cycles doivent avoir une importance comparable. En tous cas, on doit retenir que, par ces réactions nucléaires, *l'hydrogène est lentement transformé en hélium.*

Ce sont ces réactions qui entretiennent le rayonnement des astres et qui, en particulier, créent la lumière et la chaleur nécessaires à la vie.

En réalité, les réactions nucléaires ne donnent pas directement de la lumière, mais des rayons gamma ou rayons X très durs. Ceux-ci sont absorbés par la matière stellaire et réémis sous forme de radiations de plus grande longueur d'onde. Avant de parvenir à la surface de l'astre, les radiations sont ainsi absorbées et réémises un grand nombre de fois. Finalement, le rayonnement émis est sensiblement en équilibre avec la température superficielle.

Quand on connaît les réactions nucléaires qui se produisent à l'intérieur des étoiles, on peut examiner leurs effets et prévoir comment elles doivent s'amorcer l'une après l'autre. On peut donc en déduire des conséquences importantes quant à l'évolution des étoiles.

Évolution du Soleil

Nous ne développerons pas ici ce problème très complexe et fort discuté; mais nous montrerons par un exemple, très important pour nous, puisque c'est celui du Soleil, comment les connaissances récemment acquises ont profondément modifié les idées traditionnelles sur l'évolution des étoiles.

On croyait, jusqu'à ces dernières années, que le Soleil se refroidissait lentement, puisque sa contraction, seule source d'énergie que l'on considérait, devait se ralentir progressivement.

Maintenant, puisque l'on sait que la transformation de l'hydrogène en hélium est capable d'entretenir l'extraordinaire dépense d'énergie des étoiles de la branche principale, la contraction ne joue plus un rôle aussi important dans la théorie; pourtant c'est elle qui permet aux réactions nucléaires de s'amorcer, en élevant la température au centre des astres. Mais dans les étoiles de la branche principale toute l'énergie rayonnée provient des réactions qui transforment l'hydrogène en hélium. La réserve d'hydrogène contenue dans les étoiles est si grande que l'on évalue, par exemple, la « vie » du Soleil à 10 milliards d'années.

Il ne s'agit pas d'un lent déclin, car on prévoit que la lente transmutation de l'hydrogène en hélium doit avoir pour effet, en augmentant l'opacité de la matière stellaire, de faire croître progressivement la température centrale et, par suite, le rayonnement. Ainsi les théoriciens sont d'accord pour penser que notre Soleil est en train de se réchauffer; il ne déclinera que beaucoup plus tard. Dans quelques milliards d'années, le Soleil sera sensiblement 100 fois plus lumineux. A ce moment, la température à la surface de la Terre sera voisine de 300° C, et toute vie y aura vraisemblablement disparu. Ainsi la vie est destinée à disparaître sur la Terre, non par le froid, comme on le croyait jusqu'ici, mais par le feu.

J. Gauzit
Astronome à l'observatoire de Lyon.

NOTRE GALAXIE

Les nuages d'étoiles de la Voie Lactée dans la région du Sagittaire, vers le centre de la Galaxie, photographiés au télescope Schmidt de 1,20 m

Observatoires des Mts Wilson et Palomar.

LA Voie Lactée dessine une bande faiblement lumineuse à travers le ciel. Elle le partage en deux parties égales, suivant un grand cercle qui fait avec l'équateur céleste un angle de 62 degrés environ.

A la lunette, la Voie Lactée apparaît formée d'une multitude d'étoiles individuellement invisibles à l'œil nu; la photographie révèle l'existence de véritables nuées d'étoiles.

Cette apparente concentration d'étoiles dans le plan moyen de la Voie Lactée s'explique par un effet de perspective sur la sphère céleste. En effet, les étoiles ne sont pas réparties au hasard dans l'espace, mais en un amas très aplati, en forme de lentille, que l'on appelle la Galaxie. Sa forme et ses dimensions ont été déterminées par des dénombrements d'étoiles. Le centre de la Galaxie se trouve dans la direction de la constellation du Sagittaire. Son diamètre est de 100 000 années-lumière environ, son épaisseur vers le centre voisine de 10 000 années-lumière. Le Soleil se trouve à peu près dans le plan moyen de symétrie, assez loin du centre, à 27 000 années-lumière. Un certain nombre d'astres sont situés en dehors de l'amas précédent, dans une sorte de halo sphérique, dont le diamètre peut être évalué à 150 000 années-lumière.

Bien au delà de notre Galaxie, à des distances qui se comptent en millions d'années-lumière, on rencontre d'autres mondes stellaires qui peuvent contenir, comme notre Galaxie, des milliards d'étoiles. A cause de leur aspect diffus, on les a d'abord appelés des nébuleuses extragalactiques. On a maintenant reconnu d'étroites analogies entre ces systèmes et le nôtre. C'est pourquoi on préfère les désigner par le mot de galaxies, dont on fait un nom commun, tandis que le nom propre de Galaxie est réservé à notre système local. Nous verrons que l'observation des galaxies lointaines a souvent servi de guide pour l'étude de notre propre Galaxie, dont il nous est difficile de saisir la structure, puisque nous nous trouvons plongés à son intérieur.

Les amas d'étoiles

En dehors des nuées stellaires de la Voie Lactée, on rencontre ici et là, dans le ciel, d'autres amas d'étoiles, beaucoup plus petits, et appartenant à notre Galaxie. On distingue deux sortes d'amas: les *amas ouverts* et les *amas globulaires*.

Les premiers ne contiennent que quelques dizaines ou quelques centaines d'étoiles relativement

FORME GÉNÉRALE DE LA GALAXIE

peu serrées et qui peuvent être séparées à la lunette ou même parfois à l'œil nu. Par exemple, les Pléiades comptent environ 500 étoiles, parmi lesquelles l'œil nu distingue les 7 plus brillantes. Tous ces amas sont situés au voisinage du plan moyen de la Galaxie; pour cette raison, on les appelle fréquemment les amas galactiques.

Un autre amas galactique, peu éloigné des Pléiades sur la voûte céleste, mais en réalité beaucoup plus proche de la Terre, est celui des Hyades. Ses étoiles dessinent plus ou moins la lettre V dans la constellation du Taureau et l'étoile brillante rouge Aldébaran, qui représente l'œil de cet animal, nous paraît appartenir à l'amas. Il est certain que non, car Aldébaran est beaucoup plus proche de nous et, de plus, elle ne participe pas, on l'a reconnu, au mouvement d'ensemble des étoiles de l'amas. Ce mouvement a été étudié avec précision; les mesures montrent que toutes les étoiles de l'amas *paraissent* converger vers un même point du ciel; on a déterminé ainsi la direction du mouvement de ces étoiles et cette détermination a donné une méthode pour évaluer la distance du centre de l'amas (120 années-lumière environ, mais le diamètre de l'amas est considérable, de l'ordre de 65 années-lumière).

D'autres méthodes sont employées. Quand les étoiles de l'amas sont assez brillantes pour que l'on puisse obtenir leurs spectres, on en déduit leurs luminosités et ensuite, d'après leurs éclats apparents, leurs distances. Si l'étude spectroscopique présente trop de difficultés, on se contente d'évaluer la couleur des étoiles, par des mesures photoélectriques précises faites dans deux bandes étroites de longueur d'onde; on trace alors un diagramme reliant ces couleurs aux éclats apparents, analogue donc au diagramme classique de Russell qui fait intervenir les luminosités. Il est facile de reconnaître la ressemblance des deux diagrammes et, d'après la différence entre les deux échelles, on calcule la distance de l'amas.

La comparaison des diagrammes obtenus pour divers amas galactiques est très instructive. Dans nombre d'amas, on ne trouve aucune étoile de la branche des géantes; la série principale elle-même débute plus ou moins haut. Ces différences semblent indiquer que les étoiles d'un amas forment un groupe homogène, ayant approximativement le même âge. Mais il y a de grandes différences d'âge d'un amas à l'autre et leur étude est liée au problème de l'évolution des étoiles. Les différences d'âge sont confirmées par des considérations cinématiques. On prévoit que les amas ouverts doivent perdre peu à peu leurs étoiles sous l'action perturbatrice des autres étoiles. La Grande Ourse forme un amas déjà lâche, qui sera disloqué dans 500 millions d'années. Pour les Pléiades, ce temps sera de 1 ou 2 milliards d'années.

Les dimensions des amas galactiques sont comprises entre 10 et 80 années-lumière. La distance moyenne séparant les étoiles qui les forment est d'environ 1 année-lumière.

On ne connaît guère que 300 amas galactiques. Les plus éloignés sont à 20 000 années-lumière. Il est probable que ceux situés dans les régions lointaines de la Galaxie nous sont cachés par la matière dispersée au voisinage du plan moyen de la Galaxie.

Les amas globulaires

Tous les *amas globulaires* ont une forme ronde caractéristique. La concentration des étoiles vers le centre est si grande qu'on ne peut pas les séparer les unes des autres dans les lunettes. Le plus connu est l'amas d'Hercule, juste visible à l'œil nu. Les grands télescopes montrent qu'il s'agit d'un groupe ex-

traordinairement dense d'étoiles; on en a compté plus de 40 000 en dehors du noyau central. Mais la densité augmente vers le centre et l'on estime que de nombreux amas contiennent plusieurs centaines de milliers d'étoiles, peut-être des millions. Encore ne s'agit-il que des étoiles plus lumineuses que le Soleil, les seules visibles en raison des grandes distances. Le diamètre linéaire moyen des amas globulaires est d'environ 100 années-lumière.

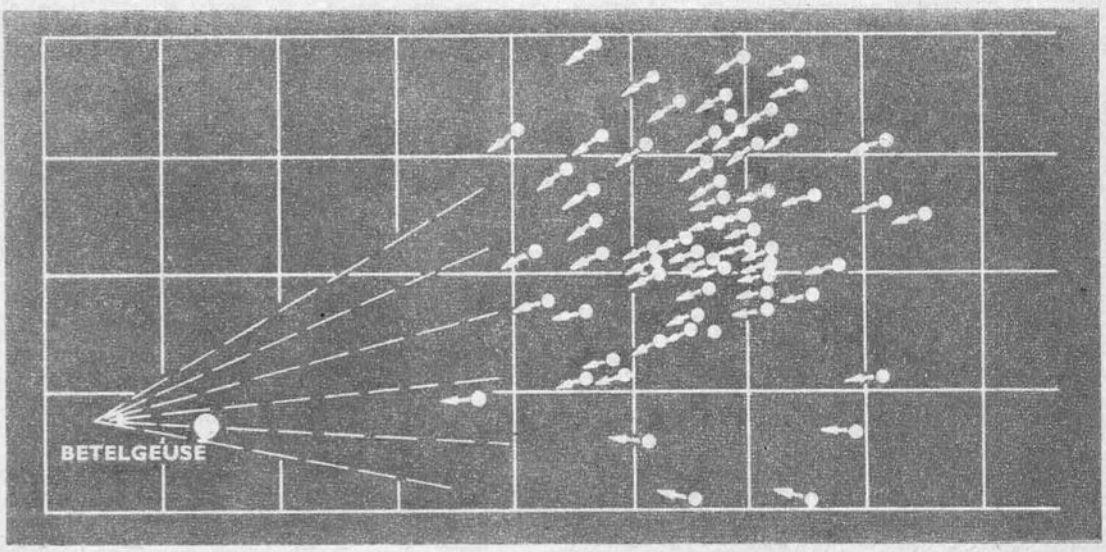
Quand on distingue individuellement des étoiles dans un amas globulaire, on trouve parmi celles-ci des étoiles variables du type dit « variables des amas », étoiles pulsantes dont la période est de quelques heures. Nous avons dit que ces étoiles ont une luminosité sensiblement cent fois supérieure à celle du Soleil. La mesure de leur magnitude apparente permet d'évaluer la distance de l'amas.

Parmi les autres méthodes d'évaluation de la distance, on emploie aussi celle du diagramme couleur-éclat apparent. Les amas globulaires donnent tous des diagrammes semblables, mais qui diffèrent nettement de ceux obtenus pour les amas ouverts. Cette distinction doit être rattachée à l'existence des *deux types de populations* stellaires, distingués par Baade. Les étoiles des amas globulaires sont caractéristiques de la population II, tandis que les étoiles telles que le Soleil appartiennent à la population I.

On a dénombré actuellement une centaine d'amas globulaires dans notre Galaxie. Les deux plus proches, visibles seulement dans l'hémisphère sud, sont situés à 22 000 années-lumière. L'amas d'Hercule est à 33 000 années-lumière. La distribution des amas globulaires, tout en présentant une nette symétrie par rapport au plan moyen de la Galaxie, montre un très faible aplatissement : les amas se rencontrent, de préférence, dans le halo de la Galaxie. Mais, par un effet de perspective dû aux très grandes distances, on observe une forte concentration de ces amas vers la constellation du Sagittaire, c'est-à-dire dans la direction du centre de la Galaxie. On n'en trouve que quatre dans la moitié du ciel opposée à ce centre.

La matière interstellaire et les nébuleuses galactiques

L'aspect de la Voie Lactée est compliqué par la présence de nuages absorbants, qui cachent complètement certaines régions. Ces nuages sont formés de poussières très fines. De plus, on a reconnu la présence dans l'espace interstellaire d'un gaz très dilué. Il n'y a donc pas un « vide » absolu entre les étoiles, comme on l'a cru pendant longtemps, mais une matière de densité moyenne extrêmement faible. Par exemple, dans les régions proches du Soleil, un volume d'espace grand comme la Terre contient à peine une masse de 1 kg. Mais, comme les distances qui séparent les étoiles les unes des autres sont très grandes,



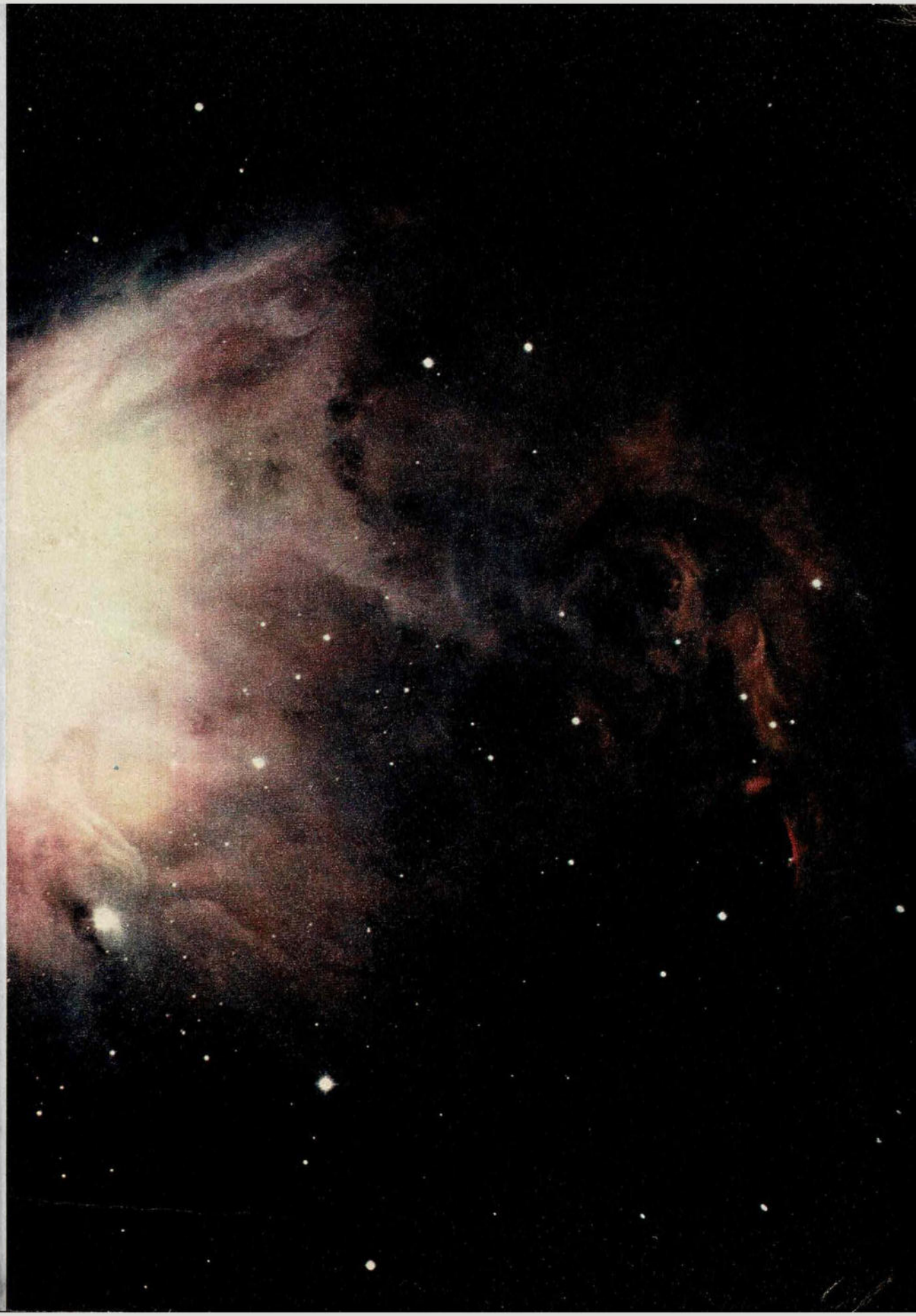
Un exemple d'amas ouvert galactique, véritable courant stellaire

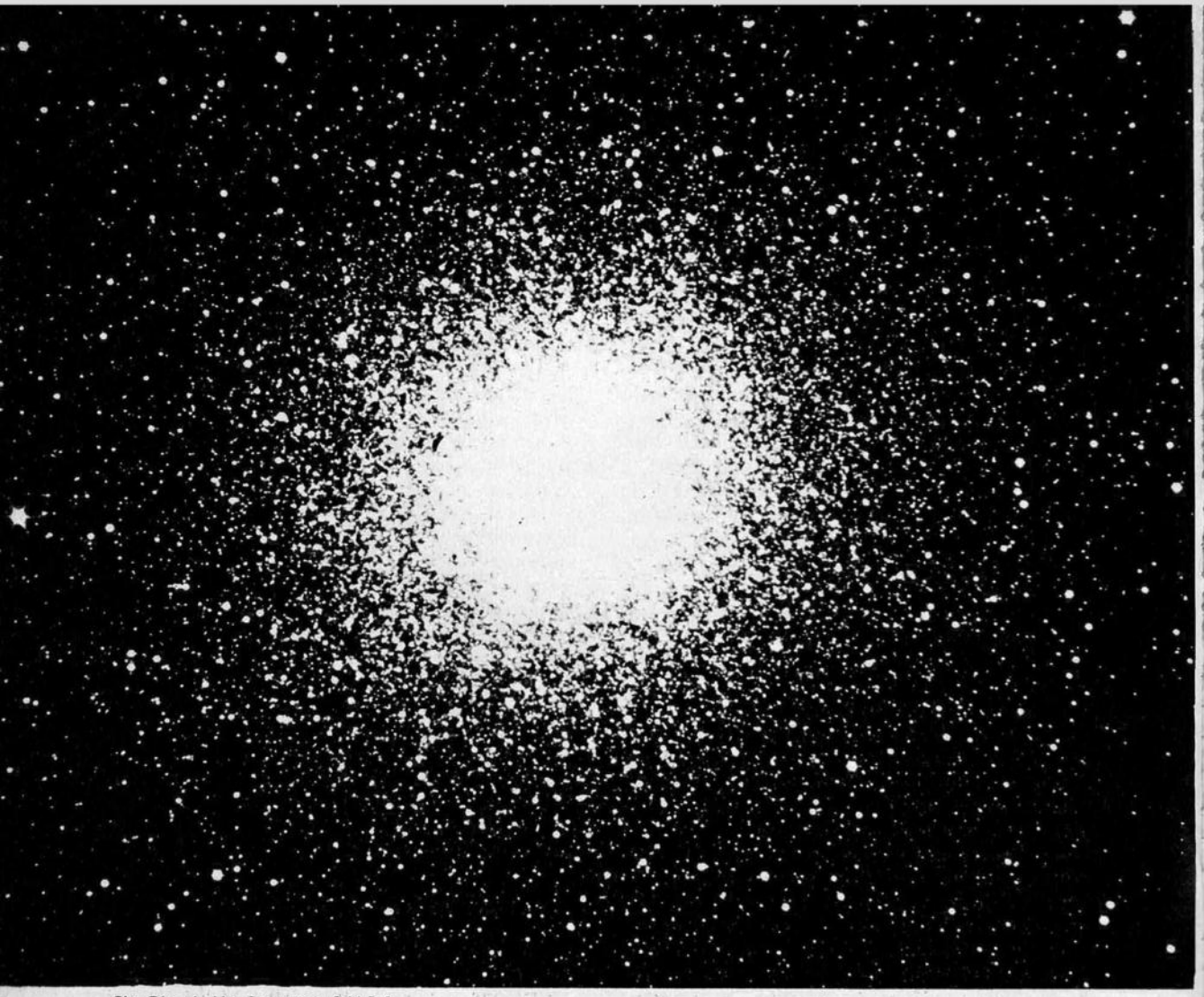
L'amas des Hyades, dans la constellation du Taureau, groupe des étoiles animées d'un mouvement sensiblement parallèle. On en a dénombré près de 300, réparties dans un volume de quelque 65 années-lumière de diamètre, qui, par un effet de perspective, semblent converger vers un point situé dans la direction de l'étoile Bételgeuse.

La grande nébuleuse gazeuse d'Orion

Cette nébuleuse apparaît à l'œil nu comme un faible halo autour d'une étoile centrale. Les gaz raréfiés dont elle est constituée sont excités par le rayonnement ultraviolet intense de l'étoile sextuple θ Orion très chaude, plongée au sein de la nébuleuse. Les régions centrales sur-exposées apparaissent ici tirant sur le jaune ; en réalité, la couleur dominante de la nébuleuse est verdâtre et due à l'émission des atomes d'oxygène deux fois ionisés. Les atomes d'hydrogène émettent les raies de Balmer qui colorent les régions bleues et violettes de la nébuleuse. Cette photographie a été obtenue sur film Super-Anscochrome avec le télescope de 5 m du Mt Palomar.

Cop. The California Institute of Technology.





Ph. Obs. de Hte-Provence, C.N.R.S.

il y a, près du Soleil, à peu près autant de matière dispersée sous forme de gaz ou de poussière que condensée en étoiles. Pour préciser les idées, disons qu'en gros la masse de gaz interstellaire est, toujours au voisinage du Soleil, cent fois supérieure à celle des poussières; et ce gaz représente, en moyenne, un atome par centimètre cube. Neuf fois sur dix, d'ailleurs, cet atome est un atome d'hydrogène.

Ce sont les atomes métalliques (calcium, sodium, potassium, etc.) qui ont été les premiers identifiés dans l'espace interstellaire, car leur présence se traduit par l'observation, dans les spectres des étoiles lointaines, de raies d'absorption particulières, appelées, à cause de leur origine, « raies interstellaires ». On les reconnaît à ce qu'elles n'accusent pas le même déplacement, par effet Doppler, que les autres raies dues aux étoiles, puisque le mouvement du gaz interstellaire suivant la direction du rayon visuel n'est pas le même que celui des étoiles. On observe parfois des raies interstellaires doubles ou multiples, chaque composante étant due à un nuage de gaz interstellaire ayant son mouvement particulier. Ces nuages ont, en moyenne, des dimensions de 30 à 50 années-lumière.

L'hydrogène neutre

Quant aux raies d'absorption de l'hydrogène, on s'attendrait à les trouver comme raies interstellaires, puisqu'elles sont prépondérantes dans les spectres de beaucoup d'étoiles. Mais leur présence est impossible, car elles font intervenir un niveau énergétique dans lequel les atomes ne se maintiennent que pendant un temps très court, environ 10^{-8} s. Or les probabilités d'absorption du rayonne-

← L'amas globulaire d'Hercule

C'est un exemple tout à fait caractéristique d'amas globulaire, de forme générale ronde, où les étoiles du noyau central atteignent une densité telle qu'on ne peut plus les séparer dans un télescope. On en a dénombré plus de 40 000 en dehors du noyau et il s'en trouve peut-être des millions dans tout l'amas.

ment, dans l'espace interstellaire, sont seulement d'une ou deux fois par mois.

C'est la radioastronomie qui a permis de déceler la présence de l'hydrogène grâce à l'observation de la raie de 21,1 cm de longueur d'onde émise par les atomes neutres d'hydrogène. Cet hydrogène neutre est le principal constituant de l'espace interstellaire.

Les nébuleuses gazeuses

Au voisinage des étoiles chaudes, l'hydrogène n'est plus neutre; il est ionisé presque complètement; électrons et protons se déplacent indépendamment les uns des autres. Quand un noyau d'hydrogène ou d'un autre élément rencontre accidentellement un électron, la capture de ce dernier s'accompagne d'une émission de lumière. C'est à ce mécanisme qu'est attribuée l'existence des *nébuleuses gazeuses* que l'on observe en divers points du ciel comme des nuages lumineux aux contours plus ou moins irréguliers et plus ou moins définis. L'intensité lumineuse est relativement forte dans certains cas, par exemple pour la Nébuleuse d'Orion, qui, visible à l'œil nu, apparaît dans les lunettes comme une masse verdâtre. La densité du gaz dans cette nébuleuse est de 10^3 à 10^4 atomes par centimètre cube, bien supérieure donc à la valeur moyenne. Ces nuages d'hydrogène ionisé sont également des sources intenses d'ondes centimétriques émises par rayonnement thermique. Pour beaucoup de nébuleuses, la lumière qu'elles émettent est si faible qu'elles sont invisibles dans les lunettes et ne sont décelées que par la photographie, au moyen de longues poses. Le spectre des nébuleuses gazeuses est formé, dans la plupart des cas, d'un certain nombre de raies brillantes appartenant à l'hydrogène, à l'hélium, au carbone, à l'azote, à l'oxygène, etc. L'origine de quelques-unes de ces raies est restée longtemps mystérieuse et l'on pensait qu'elles pouvaient être émises par un élément inconnu, auquel on avait donné le nom de « nébulium ». On sait maintenant qu'elles sont dues à des éléments ordinaires (oxygène, azote) une ou deux fois ionisés; mais il s'agit de radiations particulières dites « raies interdites », que l'on n'obtient pas dans les conditions habituelles au laboratoire, parce qu'elles exigent l'absence presque absolue de chocs sur les atomes excités et, par suite, une densité gazeuse extrêmement faible.

Lorsque le gaz entourant une étoile chaude a une densité sensiblement uniforme, la nébuleuse a une forme circulaire, aux contours bien nets. Son rayon atteint 400 années-lumière pour les étoiles très chaudes, mais il décroît très vite pour les températures plus faibles. Ces nébuleuses circulaires s'observent aisément par photographie, en utilisant un filtre isolant la raie rouge de l'hydrogène. Nous verrons plus loin que ces observations ont servi à étudier la forme des bras de notre Galaxie.

Il faut distinguer nettement des précédentes les *nébuleuses planétaires*, ainsi nommées uniquement parce qu'elles présentent parfois l'aspect d'un petit disque elliptique, plus ou moins semblable à une planète. Certaines montrent un simple anneau lumineux; d'autres ont une forme très particulière. On connaît une centaine de ces objets, tous de très faible luminosité. A leur centre, on aperçoit généralement une étoile très chaude. On a pensé que les nébuleuses planétaires entouraient d'anciennes novae ou supernovae; mais le problème de leur formation est très discuté.

Voyons maintenant ce que l'on sait de la poussière interstellaire.

La poussière interstellaire

La preuve de son existence nous est fournie non plus par l'absorption subie par quelques radiations du spectre, mais par une absorption générale, que l'on observe dans le cas des objets célestes lointains. En évaluant par plusieurs méthodes les distances de certains groupes d'étoiles, on a réussi à estimer la perte de lumière due à cette absorption. Le résultat est assez incertain, à cause de la difficulté de ces mesures et aussi à cause des variations de la densité de la matière absorbante en diverses régions de la Galaxie. Dans la région où la poussière est la plus abondante, vers le plan moyen de la Galaxie, on trouve, en gros, que 50 % de la lumière est absorbée après un parcours de 3 000 années-lumière. Les rayons qui viennent de la région centrale de la Galaxie nous arrivent affaiblis dans une telle proportion (1/1 000 à 1/10 000) qu'il n'en reste à peu près rien. Nous ne voyons donc dans cette région que les objets les plus brillants et nous ne percevons pas du tout les objets qui sont situés du côté opposé.

En se rendant compte de l'absorption exercée dans l'espace interstellaire, les astronomes ont été amenés à corriger leurs anciennes éva-

Nébuleuse Trifide du Sagittaire →

C'est une belle nébuleuse formée par de la matière lumineuse excitée comme celle de la Grande Nébuleuse d'Orion, et par de la matière obscure dont les nuages absorbants situés devant la nébuleuse provoquent des traînées sombres sur le cliché pris au télescope Schmidt de Palomar.

↑ Nébuleuse "Dumb-Bell"

C'est un nuage de gaz raréfiés situé à environ 3 400 années-lumière et qui apparaît comme un disque de structure complexe. Comme pour la Grande Nébuleuse d'Orion, le nuage est excité par une étoile bleue très chaude située à sa partie centrale (télescope de 5 m du Mont Palomar).

Copyright The California Institute of Technology.

Une nébuleuse obscure curieuse →

C'est la nébuleuse en « Tête de cheval », que l'on voit ici photographiée en lumière rouge avec le télescope de 5 m du Mont Palomar. Ce nuage de matière opaque aux dimensions gigantesques se dessine, dans la constellation d'Orion, à la manière d'une ombre chinoise, sur un fond luminescent constitué par une nébuleuse gazeuse à émission.

luations des distances des objets lointains, notamment les dimensions de la Galaxie. Ils avaient admis, en effet, que le faible éclat des astres lointains était dû à leurs distances; il faut tenir compte aussi de l'absorption subie tout le long du trajet.

Les observations ont montré que l'absorption de la lumière est accompagnée d'un changement de couleur : les étoiles lointaines, dont les rayons traversent pour nous parvenir une grande épaisseur de matière interstellaire, nous paraissent plus rouges, de la même manière que le Soleil et tous les astres, lorsque, en se rapprochant de l'horizon, ils sont vus à travers une plus grande épaisseur d'air. Puisque l'absorption est plus faible pour les radiations de grandes longueurs d'onde, on comprend l'intérêt que présente l'emploi de ces radiations (rouges, infrarouges et mieux encore radio) pour l'exploration des grandes distances.

L'effet de rougissement dépend des dimensions des particules diffusantes. On calcule pour celles de l'espace interstellaire un diamètre moyen de l'ordre du dixième de micron.

La poussière interstellaire exerce encore une autre action : la lumière des étoiles lointaines est faiblement polarisée. On en déduit que les particules ne sont pas sphériques, mais ont la forme d'aiguilles ou, du moins, d'ellipsoïdes, et sont en majorité orientées dans une direction, sans doute sous l'action de champs magnétiques interstellaires.

L'origine de la poussière interstellaire paraît surprenante. Mais il faut noter que certaines raies interstellaires d'absorption appartiennent à des combinaisons d'atomes, comme CH et CN. Malgré la rareté des chocs dans l'espace interstellaire, ces combinaisons se forment donc, et sans doute aussi des molécules simples comme H_2O, NH_3, CH_4, etc. Ces molécules doivent servir de noyaux de condensation, autour desquels la matière interstellaire se fixe.

Nous avons donné une valeur moyenne pour la densité de la poussière interstellaire. En fait, cette poussière est, comme le gaz, rassemblée généralement en nuages. Lorsque ces nuages sont denses, ils sont absolument opaques. La présence de ces « nébuleuses obscures », comme on les appelle parfois, explique les nombreux « trous noirs » que l'on observe dans la Voie Lactée. Citons, parmi les plus connus, le « sac à charbon » près de la Croix-du-Sud, et ceux de la constellation d'Ophiuchus. Ce sont des nuages absorbants qui nous donnent l'illusion que la Voie Lactée se divise en deux branches dans la constellation de l'Aigle.

Quand un nuage de gaz et de poussière est voisin d'une étoile très lumineuse mais pas assez chaude pour provoquer l'ionisation, on observe une nébuleuse due simplement à la

Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar

diffusion de la lumière par les poussières. Un exemple typique de ces nébuleuses est celui des enveloppes des Pléiades. Les deux mécanismes de diffusion et de luminescence interviennent simultanément dans de nombreuses nébuleuses galactiques.

La rotation de la Galaxie

La forme très plate de la Galaxie semble indiquer un mouvement rapide de rotation autour d'un axe passant par son centre et perpendiculaire au plan moyen. De plus, cette rotation est nécessaire, sinon la force d'attraction exercée par le noyau sur les régions externes précipiterait ces dernières vers le centre de la Galaxie, exactement de la même manière que, par exemple, la Terre tomberait sur le Soleil si elle venait à être arrêtée un instant sur sa trajectoire. Enfin, nous verrons que notre Galaxie appartient à la famille des galaxies spirales, et les mesures spectroscopiques montrent que toutes les spirales tournent sur elles-mêmes.

C'est donc son mouvement de rotation qui assure l'équilibre de notre Galaxie et lui donne

Nébuleuse "North America" du Cygne

Elle doit son nom à sa silhouette qui rappelle celle du continent Nord-Américain. Les gaz raréfiés sont excités par quelques étoiles qui n'ont pas été identifiées ; ils apparaissent rougis par l'absorption sélective d'un nuage de fines poussières interposé.

Cop. The California Institute of Technology.

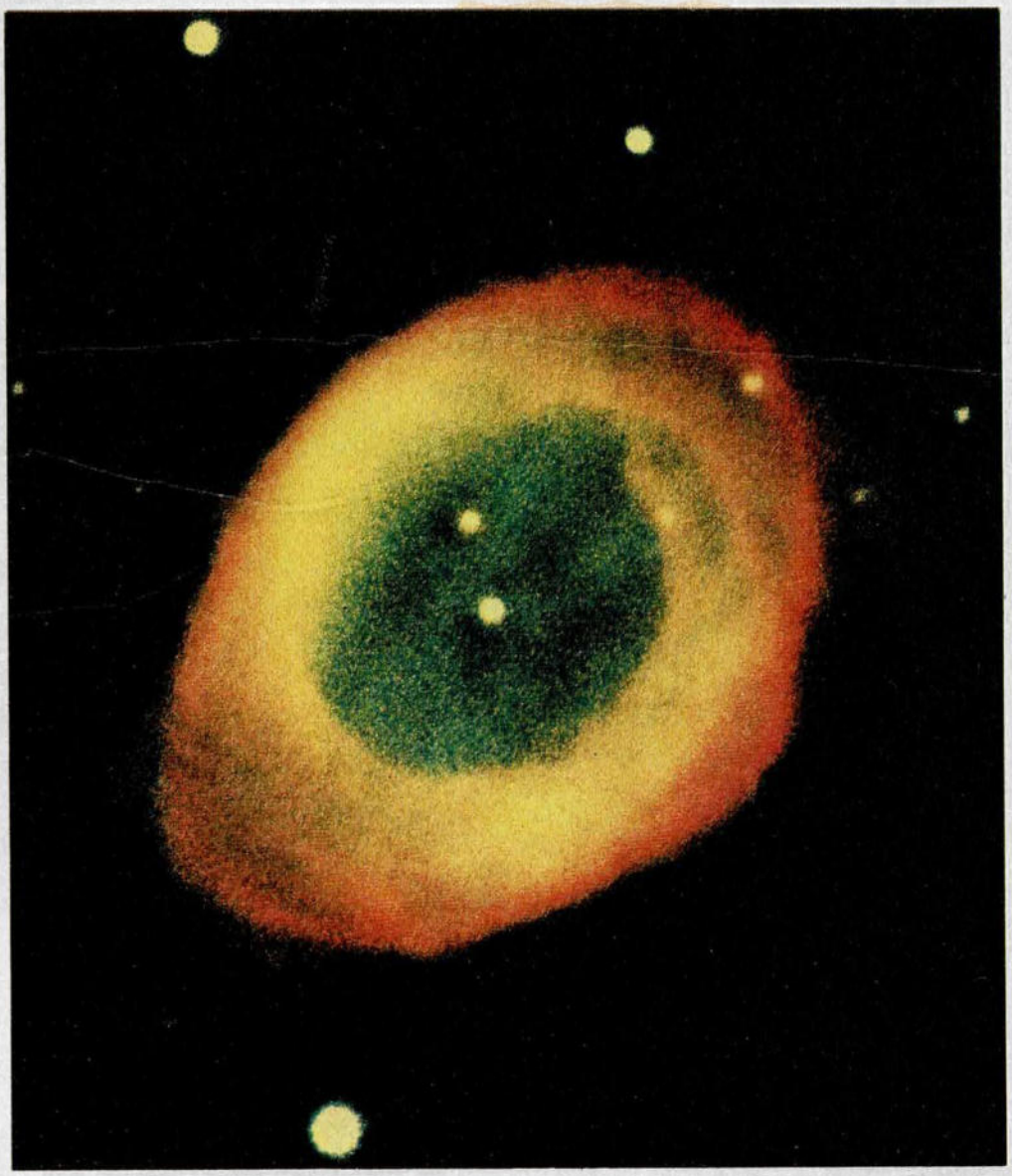
Une grande nébuleuse filamenteuse dans la constellation du Cygne

Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

Nébulosités obscures et luminescentes dans la constellation de la Licorne

← Nébulosités entourant les Pléiades

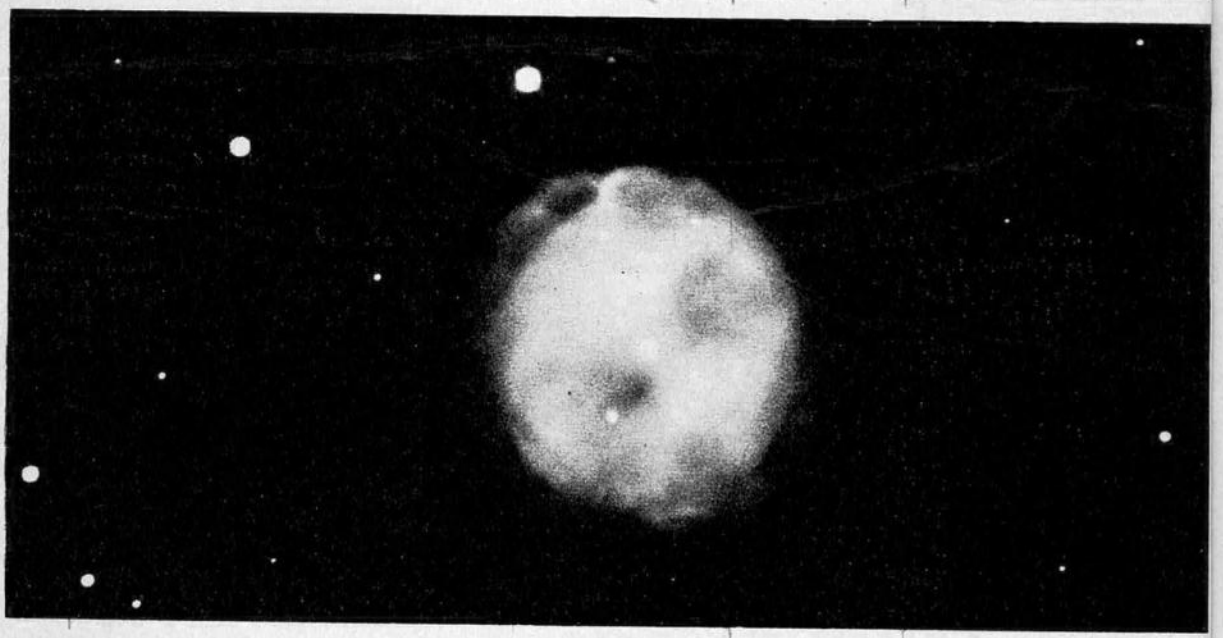
Là encore il s'agit de gaz raréfiés (et aussi de poussières). Mais les étoiles voisines ne sont pas assez chaudes pour exciter les atomes et la matière nébuleuse diffuse simplement leur lumière et présente le même spectre. (Télescope Schmidt de 120 cm du Mont Palomar).



↑ Nébuleuse annulaire de la Lyre

Cet anneau, ici photographié au télescope de 5 m du Mont Palomar et, comme les objets colorés précédents, sur Super-Anscochrome, est en réalité une bulle de gaz raréfiés émise jadis par l'étoile centrale chaude. Les gaz de la nébuleuse sont excités par le rayonnement de l'étoile.

Copyright The California Institute of Technology.



sa forme. Mais nous pouvons prévoir que cette forme est lentement modifiée par la rotation. La galaxie ne tourne pas en bloc, à la manière d'une roue ou d'un volant; les régions internes ont un mouvement de rotation plus rapide que les bords. Le cas est analogue à celui du système solaire, où, nous le savons, la vitesse des planètes sur leurs orbites est d'autant plus grande qu'elles sont plus près du Soleil; ou encore au système des anneaux de Saturne, dont les régions internes tournent plus vite que les externes. Ce caractère se comprend aisément : les étoiles voisines du centre de la Galaxie sont celles sur lesquelles la force d'attraction du noyau est la plus grande; il faut aussi, pour que la force centrifuge équilibre cette attraction, que ce soient celles animées du mouvement de rotation le plus rapide.

Par un ensemble de travaux récents, les astronomes ont réussi à démontrer directement la rotation de la Galaxie.

Nous avons déjà parlé du mouvement des étoiles et du Soleil. Ce mouvement est mesuré par rapport à un groupe d'étoiles de comparaison, c'est-à-dire par rapport à quelques milliers d'étoiles situées à 3 000 ou 4 000 années-lumière. On peut comparer ce mouvement à celui des abeilles dans un essaim ou à celui des passagers sur le pont d'un navire.

← Deux nébuleuses planétaires

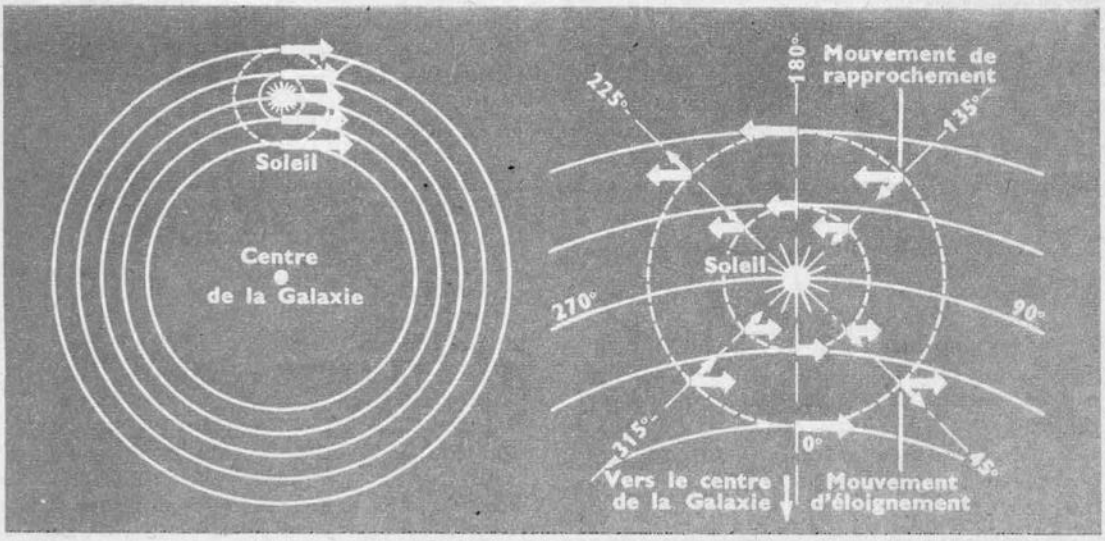
Ces objets présentent un aspect qui évoque des planètes du système solaire comme Neptune ou Uranus, d'où le nom sous lequel on les désigne couramment. En haut, la nébuleuse NGC 7 009 dans le Verseau. En bas NGC 3 887, dite nébuleuse de la Chouette, où l'on distingue bien l'étoile centrale très chaude.

Pour étudier le mouvement de la Galaxie dans son ensemble, on a tiré profit de la propriété signalée ci-dessus, à savoir que les vitesses des étoiles décroissent vers l'extérieur de la Galaxie. Un observateur qui se déplace avec le Soleil observe seulement les vitesses relatives, c'est-à-dire la différence entre les mouvements des étoiles qu'il considère et son propre mouvement. Représentons ci-dessous à grande échelle la région voisine du Soleil et les vitesses relatives. Comme on le voit, les étoiles de la Voie Lactée situées dans les directions qui font un angle de 45° et de 225° avec la direction du centre doivent s'éloigner de nous avec la plus grande vitesse; au contraire, dans les directions de 135° et de 315°, les étoiles doivent s'approcher le plus rapidement; enfin, dans les directions du centre, à 90°, à 180° et à 270°, les étoiles ne doivent pas avoir de mouvement radial; elles ne doivent donc ni s'approcher, ni s'éloigner.

Tel est bien l'effet qui a été mis en évidence. Pour qu'il soit sensible, il faut évidemment faire intervenir un grand nombre d'étoiles afin d'éliminer l'influence du mouvement particulier de chaque étoile. Il faut aussi que ces étoiles soient assez lointaines pour que l'action de la rotation différentielle, comme on l'appelle, soit mesurable. On constate, en effet, que l'augmentation de vitesse est d'autant plus marquée qu'il s'agit d'astres situés à de plus grandes distances, jusqu'à 10 000 années-lumière.

Ces recherches ont permis de préciser la position du centre de la Galaxie, sa distance au Soleil (27 000 années-lumière) et la vitesse de la rotation galactique. Pour les étoiles voisines du Soleil, cette vitesse est de 220 km/s, ce qui signifie que, pour ce groupe d'étoiles, la durée d'une rotation complète autour du noyau est de l'ordre de 250 millions d'années. Période énorme par comparaison aux courtes vies humaines, mais petite par rapport à la durée de vie du Soleil et de notre globe, puisque le Soleil et son système de planètes ont dû accomplir une vingtaine de fois déjà leur gigantesque voyage autour du noyau de la Galaxie. Ce mouvement s'accompagne, nous l'avons dit, d'un brassage, les régions voisines du noyau tournant plus vite que les bords. Ainsi, pendant que le Soleil fait un tour, les groupes d'étoiles deux fois plus proches du centre en font deux.

L'étude de la rotation de la Galaxie a permis d'obtenir la masse totale de ce système, puisqu'il faut que l'attraction de cette masse



Comment on met en évidence directement la rotation de la Galaxie

On a représenté à droite la région de la Galaxie voisine du Soleil et les vitesses relatives des étoiles par rapport à lui, déduites des mesures de vitesses radiales. On voit, sur le schéma de gauche, l'interprétation de ces données pour l'ensemble de la Galaxie dont les parties les plus éloignées du centre tournent le moins vite.

Structure spiralée de la Galaxie

Cette image de notre Galaxie a été établie, grâce à la radioastronomie, par l'étude de la raie de 21 cm de longueur d'onde de l'hydrogène neutre. On voit que l'hydrogène est rassemblé en nuages abondants le long de bras de forme sensiblement circulaire, autour du noyau central. La Galaxie tourne dans le sens d'enroulement de ces bras. Le Soleil et son cortège de planètes se trouve situé sur le bord interne d'un tel bras auquel on a donné le nom de bras d'Orion.

équilibre le mouvement de rotation. On trouve une valeur de l'ordre de 150 milliards de fois la masse du Soleil, dont une part importante serait concentrée près du noyau.

Quant au nombre total d'étoiles de la Galaxie, il est très difficile à estimer, mais on pense qu'il est donné, en gros, lui aussi, par le nombre : 150 milliards. Il ne faut pas en déduire qu'il s'agit de 150 milliards d'étoiles semblables au Soleil. Nous avons dit qu'une masse notable de la Galaxie est formée de gaz et de poussières interstellaires. D'autre part, parmi les étoiles, ce sont les plus petites qui sont les plus nombreuses.

Structure de la Galaxie

Il est difficile de connaître l'architecture de la Galaxie, car de nombreuses régions se projettent les unes sur les autres et, surtout, des nuages absorbants de matière interstellaire nous en cachent la majeure partie. Peu à peu pourtant on a acquis la certitude que notre Galaxie a une forme et une structure qui rappellent celles de la Grande Nébuleuse d'Andromède; on a notamment réussi à mettre en évidence plusieurs de ses bras.

Une première méthode pour étudier cette structure a été inspirée par l'observation des galaxies spirales, en particulier de la Nébuleuse d'Andromède. On a constaté que les bras des spirales sont étroitement jalonnés par des étoiles supergéantes, le plus souvent enveloppées elles-mêmes, comme nous l'avons expliqué plus haut, de nuages brillants d'hydrogène. Ces objets ressortent particulièrement bien sur des photographies obtenues récemment par Courtès à l'Observatoire de Haute-Provence, en isolant la radiation rouge de l'hydrogène. On les a recherchés systématiquement dans la Voie Lactée, en même temps qu'on a déterminé les distances des étoiles associées. En portant ensuite les positions de ces étoiles dans un diagramme représentant le plan galactique, on a constaté qu'elles s'alignent de manière à tracer trois portions de bras : l'un passant au voisinage du Soleil, à 1 000 années-lumière dans la direction opposée au centre; un deuxième plus éloigné du centre, presque parallèle au premier, à 6 000 années-lumière, et un troisième, à peine esquissé, vers le centre, à 4 500 années-lumière du Soleil.

Les nuages brillants, dont nous venons de parler, contiennent de l'hydrogène qui est ionisé par le rayonnement des étoiles chaudes voisines et constitue une source intense d'ondes centimétriques. Il est apparu vraisemblable que les nuages d'hydrogène neutre devaient s'aligner, eux aussi, le long des spires. Pour localiser ces nuages, on a étudié minutieusement l'émission, par les atomes neutres d'hy-

drogène, de la raie de 21 cm de longueur d'onde, dont nous avons déjà parlé. Le grand avantage de cette méthode par rapport aux observations optiques classiques tient, rappelons-le, à la très faible absorption exercée par la poussière interstellaire sur les ondes utilisées en radioastronomie; ces ondes peuvent donc atteindre des régions beaucoup plus lointaines, en particulier le centre de notre Galaxie, ou même les bras de la Galaxie du côté opposé à celui où se trouve le Soleil. L'hydrogène neutre interstellaire n'exerce lui-même presque pas d'absorption sensible. En observant dans une direction, on reçoit donc l'émission de toutes les sources situées sur cette ligne.

Quand ces sources sont en mouvement par rapport au Soleil, la longueur d'onde observée se trouve déplacée par effet Doppler; la mesure du décalage donne la vitesse radiale. En pratique, à partir de cette vitesse radiale, on déduit la distance de la source, puisque, nous l'avons vu, on connaît d'une manière satisfaisante les mouvements de la Galaxie et, par suite, les vitesses radiales des différents points de la Galaxie par rapport au Soleil. On détermine donc le profil de la raie dans une direction donnée; on observe, par exemple, un, deux, trois... maximum montrant qu'il existe plusieurs régions denses, dont on évalue les distances. En examinant de proche en proche les diverses longitudes, on obtient une carte des nuages d'hydrogène neutre.

La carte des nuages d'hydrogène

Cette carte montre qu'en gros l'hydrogène est rassemblé le long de bras presque circulaires, qui concordent bien, au voisinage du Soleil, avec ceux identifiés par l'étude optique des étoiles chaudes. Le Soleil se trouve sur le bord interne d'un bras, dont on suit le développement presque jusque dans la région diamétralement opposée. Deux autres bras sont visibles vers l'extérieur; le plus éloigné est le moins dense; deux bras au moins se dessinent autour du centre de la Galaxie. Les bras spiraux externes s'écartent un peu du plan galactique, en particulier dans la direction des Nuages de Magellan.

Les mesures ont précisé aussi le sens de rotation de la Galaxie et montré avec certitude que les bras s'enroulent dans le sens du mouvement.

A l'émission thermique de l'hydrogène ionisé, particulièrement dense dans le plan galactique, et à l'émission de l'hydrogène neutre, se superposent, sur ondes métriques, des émissions beaucoup plus intenses dues à des particules de grande énergie tournant dans le champ magnétique de la Galaxie. L'une de ces émissions, localisée aussi dans le plan galactique, a été rattachée également à la structure spirale.

Un fait encore plus intéressant est la découverte du halo de particules dans lequel baigne notre Galaxie. L'émission radio sur ondes métriques dans les régions éloignées du plan galactique est loin d'être nulle. Elle est due à l'émission de particules de grande énergie, comme l'émission du plan galactique, mais qui forment un halo tout autour de notre Galaxie, halo environ sphérique et de 100 000 années-lumière de diamètre. L'existence de ce halo montre d'autre part que le champ magnétique de la Galaxie peut s'étendre très loin du plan galactique, là où la population stellaire est pratiquement nulle.

Le centre de la Galaxie

En prenant des photographies en rayons infrarouges, on a réussi à explorer la région du centre de la Galaxie. Mais dans ce domaine également les résultats les plus importants ont été obtenus par les méthodes radioastronomiques. Le centre de la Galaxie se présente comme une source d'émission radioélectrique intense et étroite, dont le diamètre est compris entre un demi-degré et un quart de degré. Tout autour apparaît une source beaucoup moins intense, de 2° de diamètre. La région du noyau est pauvre en hydrogène neutre; l'émission radioélectrique y est d'origine thermique.

Nous avons dit plus haut que les vitesses dues à la rotation de la Galaxie croissent vers le centre. Les mesures radioélectriques montrent qu'en fait, à partir d'une distance au centre de l'ordre de 20 000 années-lumière, la variation tend à se faire dans le sens inverse.

Enfin, l'étude radioastronomique de la région centrale de la Galaxie a révélé un fait inattendu : cette région centrale est en expansion. A une distance de 10 000 années-lumière du centre, l'hydrogène neutre participe à la fois à la rotation galactique et à un mouvement d'expansion, dont la vitesse est de 50 km/s. On estime qu'il sort ainsi chaque année des régions centrales de la Galaxie une masse d'hydrogène égale à celle du Soleil. On pense actuellement que cette perte est compensée aux dépens du halo galactique, dont la matière semble tomber lentement vers le plan galactique. Ces phénomènes seraient sous la dépendance du champ magnétique de la Galaxie.

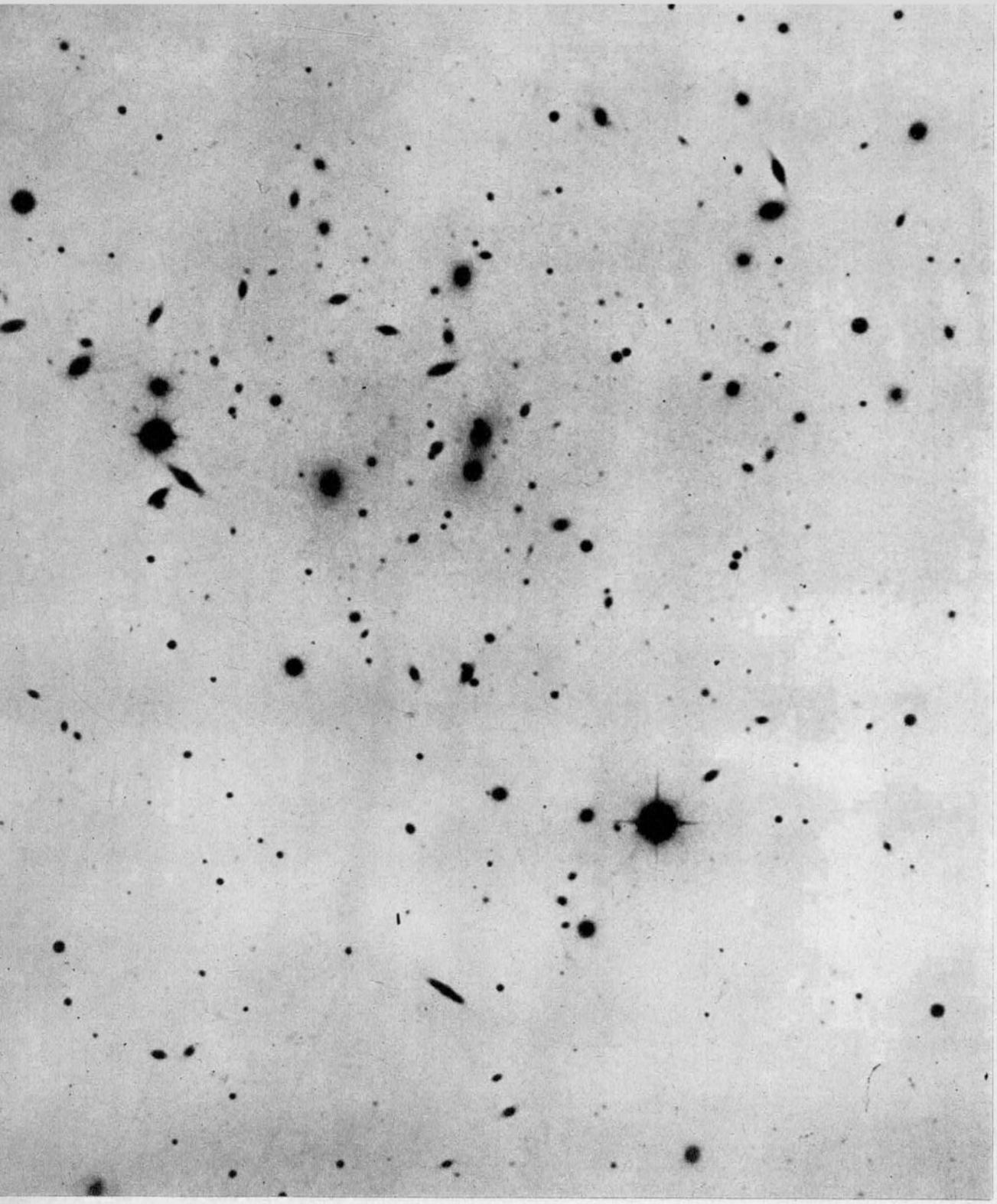
J. Gauzit
Astronome à l'Observatoire de Lyon

LES GALAXIES ET L'EXPANSION DE

ON s'est demandé pendant longtemps si la Galaxie constituait à elle seule l'Univers. En effet, tous les objets célestes, étoiles, amas d'étoiles, nébuleuses gazeuses brillantes et obscures, s'avéraient partie intégrante de cet immense ensemble. Toutefois, depuis 1850 environ, les observations ont mis en évidence des nébuleuses en forme de tourbillon, les *nébuleuses spirales*, dont l'appartenance

L'UNIVERS

à notre Galaxie paraissait discutable. Rien, en apparence, ne les distingue des nébuleuses gazeuses comme celle d'Orion. Mais le spectre de leur lumière rappelle celui des étoiles et non des gaz. Il est vrai que nombre de nébuleuses gazeuses se bornent à réfléchir la lumière des étoiles qui les éclairent — comme autour des Pléiades — et présentent un spectre d'apparence stellaire . . .



Un champ de galaxies lointaines dans la Couronne Boréale

A part les taches les plus grosses, nettes et rondes, dues manifestement à des étoiles proches qui font partie de notre propre système galactique, presque toutes les taches que l'on peut discerner sur ce cliché en négatif sont des galaxies qui constituent un véritable amas. La plupart d'entre elles sont elliptiques. Leur distance a été évaluée à près d'un milliard d'années-lumière.

... Certains astronomes affirmaient leur conviction que les Spirales étaient des agglomérations d'étoiles si lointaines que leur « résolution » en images distinctes n'avait pas encore été réussie. D'autres maintenaient l'opinion — malgré la difficulté relative au spectre — que les Spirales étaient des formations gazeuses de peu d'étendue, intérieures, comme tout le reste, à notre Galaxie. La question fut tranchée en 1924 par la résolution en étoiles, sur un cliché du Mont Wilson dû à Edwin Hubble, de la Grande Spirale d'Andromède, Messier 31, une de nos proches voisines.

Parmi ses étoiles, on découvrit d'emblée des variables Céphéides (étoiles standard de la famille des RR Lyrae, plus lumineuses mais à pulsations plus lentes). On put ainsi établir la distance et la taille de Messier 31. Cet objet se trouve à 2 millions d'années-lumière, et son diamètre dépasse 100 000 années-lumière; il est plus grand que celui de notre propre Galaxie. Autrement dit, l'objet se trouve loin au delà des limites de notre îlot stellaire et représente un îlot au moins égal en importance, avec quelque cent milliards d'étoiles.

Réciproquement, on soupçonna que notre Galaxie, par analogie, devait présenter une structure spiralée. Mais pour nous, plongés au sein de la cohue stellaire et, surtout, au sein des matériaux diffus qui encombrent nos parages, le tracé des spires est vraiement difficile à repérer.

Il a fallu l'intervention récente de la radioastronomie pour fournir une bonne esquisse, compliquée mais incontestable, de l'écheveau spiralé de notre propre Galaxie. Les spires sont dessinées par l'hydrogène neutre, perceptible sur 21 centimètres de longueur d'onde. Des étoiles se forment encore de nos jours dans les spires ou en leur voisinage immédiat. Notre Soleil est en bordure d'une spire, du côté concave vers le centre de la Galaxie.

La galaxie, unité cosmique

La Voie Lactée, avec ses bancs de brume, masque le fond du ciel sur 40° d'épaisseur. Mais lorsqu'on examine les clichés pris en dehors de cette zone masquée, on découvre des spirales de plus en plus petites à mesure que l'on prolonge la pose. Pour finir, les images ressemblent à des images stellaires ponctuelles, mais un peu plus floues. Cette investigation a montré que la forme spirale, qui est la plus belle, la plus frappante, n'est pas la seule, ni même la plus fréquente, à convenir aux grandes agglomérations stellaires autonomes. Certaines agglomérations sont irrégulières, comme les Nuages de Magellan, satellites de notre Galaxie. Les plus abondantes sont ellipsoïdales, comme les deux compagnons de Messier 31.

On a donc convenu de dénommer *galaxies* (par analogie avec la nôtre, qui conserve ce nom avec une majuscule: la Galaxie) tous les membres de cette immense famille.

Aussi loin que nous puissions y porter nos regards, l'Univers apparaît aujourd'hui comme peuplé de galaxies.

La galaxie est l'unité cosmique. Toutes les galaxies ne sont pas, il est vrai, aussi riches que la nôtre ou que Messier 31, échantillons de forte taille. Le menu fretin des galaxies semble dix fois moins étendu et moins massif : un diamètre de 10 000 années-lumière et une masse de 10 milliards de Soleils semblent (autant qu'on en puisse juger encore) les caractéristiques les plus fréquentes parmi les galaxies. Toutefois, il ne faudrait pas verser à nouveau dans l'anthropocentrisme en attribuant à notre Galaxie une prééminence quelconque. Outre Messier 31, les spécialistes ont déjà reconnu bon nombre de galaxies géantes nettement supérieures à la nôtre.

Les amas de galaxies

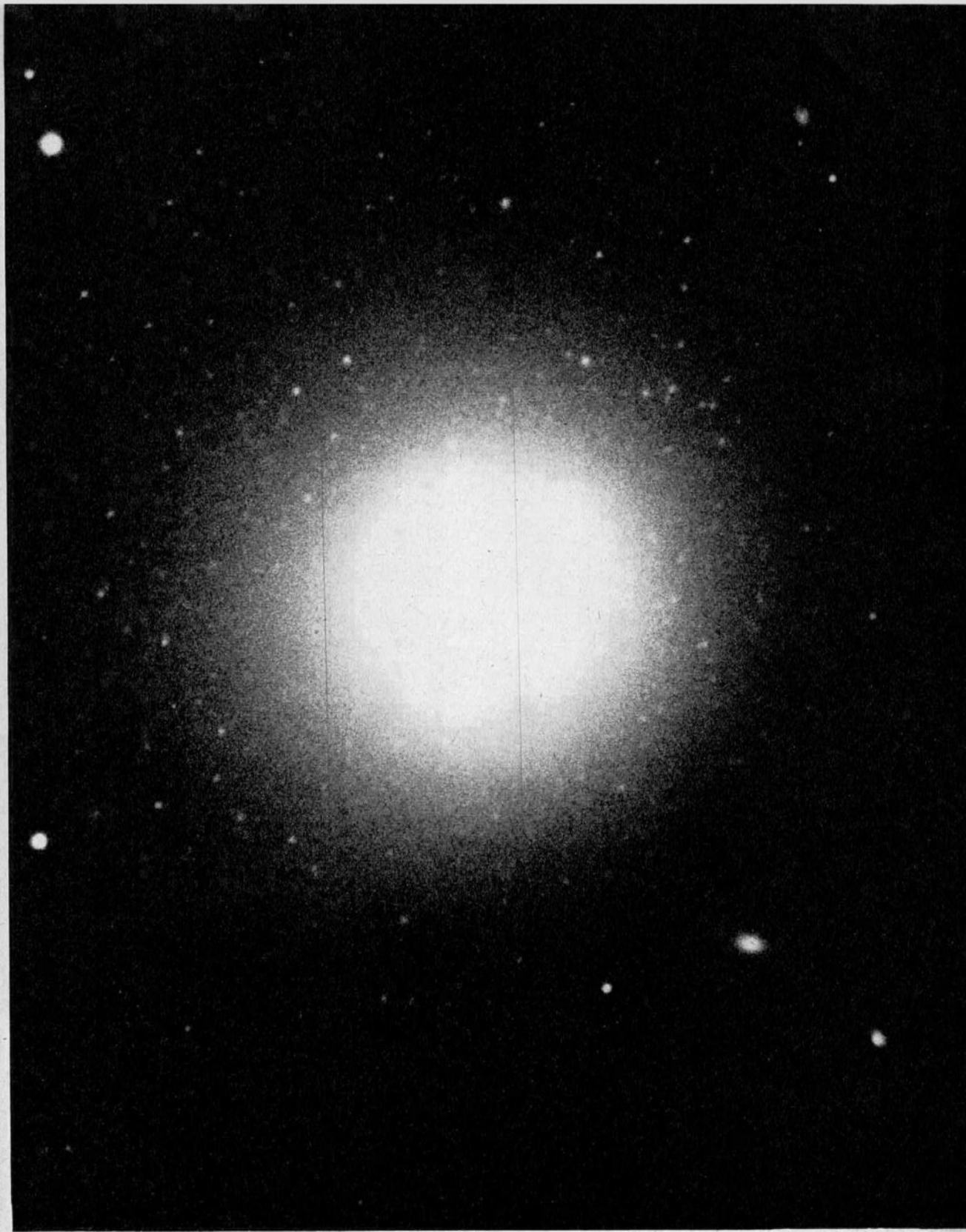
Les galaxies se trouvent fréquemment associées par petits groupes de quelques unités, par amas de quelques dizaines ou centaines, et même par immenses troupeaux, dont les membres se comptent par milliers. Les constellations voisines de la Vierge (Virgo) et de la Chevelure de Bérénice (Coma) donnent de beaux exemples de riches agglomérations. L'amas Virgo, dont le centre de gravité se situe à 50 millions d'années-lumière, est le plus proche des grands amas. Son étude statistique est en cours : elle sera des plus précieuses pour le calibrage définitif des critères de distance. Dans les amas les plus peuplés, les Spirales manquent : toutes les galaxies ont une forme fuselée ou sphéroïdale. L'explication est la suivante : les spires sont engendrées par le gaz qui subsiste dans une galaxie, après la première condensation d'étoiles. Les galaxies privées de reliquat de gaz évoluent donc (avec leur contenu stellaire initial) sans engendrer de spires, ni d'étoiles de seconde génération. Or, dans les amas trop serrés, les approches mutuelles des galaxies, leurs compénétrations, sont fréquentes et de nature à les purger de tous leurs gaz. Toutes les galaxies des amas denses sont sphéroïdales ou fuselées : aucune spire n'apparaît jamais.

Sur les clichés pris loin de la Voie Lactée en latitude, les images fines de galaxies deviennent plus nombreuses que les étoiles dès qu'on

Ph. Observatoire Lick
Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

Une galaxie spirale typique, la grande nébuleuse d'Andromède

Cette nébuleuse spirale présente une structure générale tout à fait analogue à celle que nous pouvons attribuer à notre propre Galaxie. Elle se trouve éloignée de nous d'environ deux millions d'années-lumière et est vue obliquement à partir de la Terre. Son diamètre est supérieur à cent mille années-lumière et on pense qu'elle doit rassembler quelque cent milliards d'étoiles.



Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

La galaxie globulaire N G C 4486 de la constellation de la Vierge

La plupart des galaxies ne sont pas spirales, mais du type globulaire, comme l'est d'ailleurs le compagnon de la spirale d'Andromède, visible au-dessus de cette spirale sur la photographie de la page précédente. NGC 4486 est un puissant émetteur d'ondes radioélectriques. On aperçoit dans le champ du cliché ci-dessus un certain nombre de petites galaxies elliptiques plus éloignées.

Un groupe de quatre galaxies →

Elles se trouvent à au moins 60 millions d'années-lumière, dans la constellation du Lion. Au centre, une galaxie spirale, vue par la tranche, avec des bandes équatoriales sombres typiques ; en haut, à gauche, une galaxie elliptique. Les deux autres sont des spirales barrées dont celle du haut montre des bras divergents aux extrémités de la barre formant noyau.

dépasse la 21e grandeur. Aujourd'hui, on pourrait photographier des milliards de galaxies.

Dans aucune direction de l'espace le peuplement en galaxies ne s'appauvrit ni ne s'étoffe, du moins si l'on se place à une échelle suffisante pour que l'influence d'un amas riche soit négligeable. Autrement dit, l'Univers se présente à nous comme uniformément peuplé de galaxies ou d'amas de galaxies (si l'on néglige les inégalités locales, la variété dans le détail, qui sont la règle). Et, ce qui est essentiel pour la cosmologie, on n'a nulle part l'impression que l'on approche d'une frontière ni d'un centre de l'Univers.

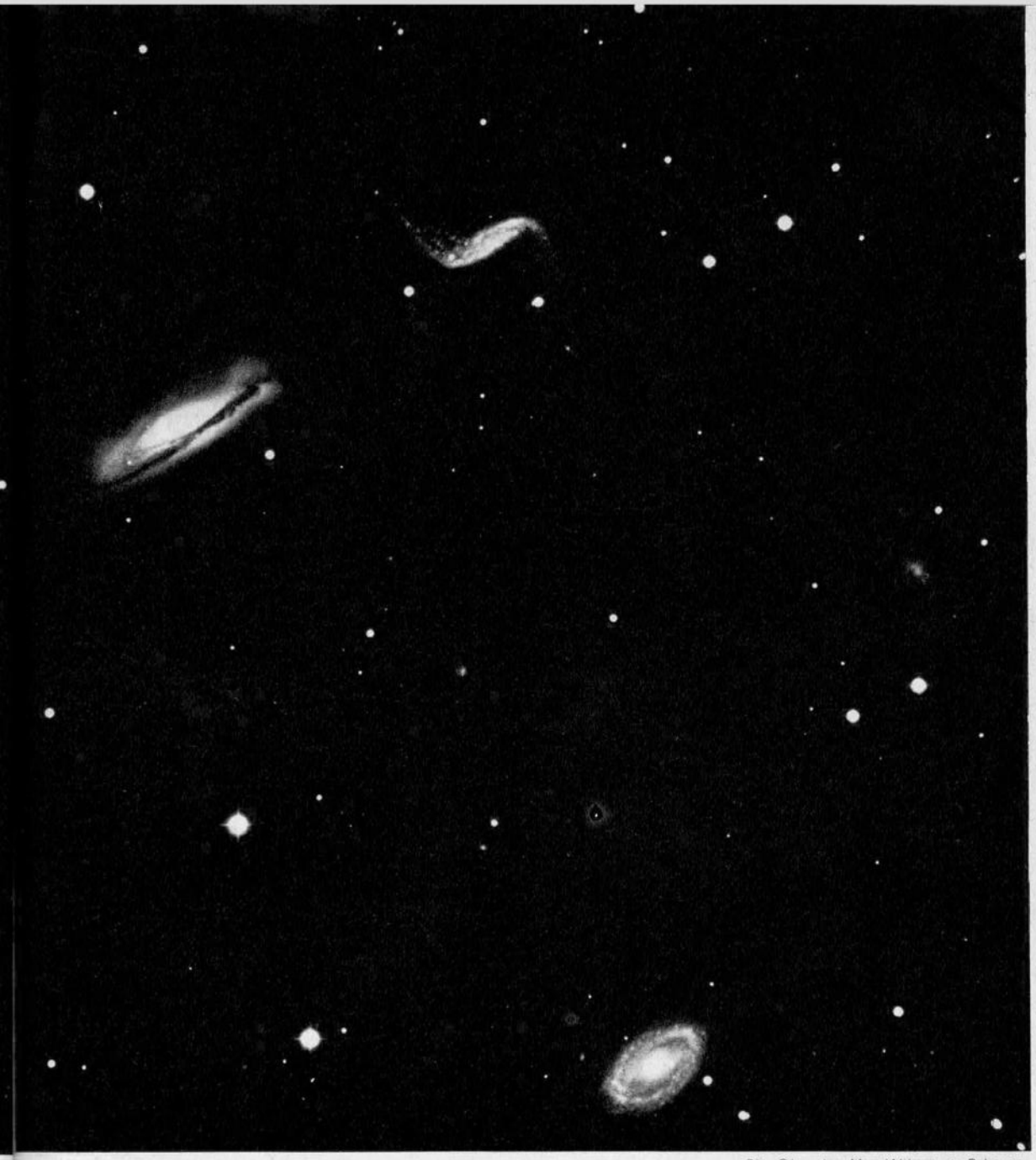
Le décalage du spectre des galaxies

Le spectre de la lumière des galaxies montre un certain nombre de raies sombres : par exemple, les raies H et K du calcium ionisé dans l'extrême violet. Assez souvent, on y découvre aussi certaines raies brillantes (raies d'émission) comme celle de l'oxygène ionisé dans l'ultraviolet (3 730 angströms). Si l'on compare les positions de ces raies à celles de nos spectres de laboratoire, on découvre que le spectre des galaxies est décalé vers son extrémité rouge. A priori, il était légitime d'attribuer ce décalage à une « vitesse de fuite » des galaxies (effet Doppler-Fizeau). Si une raie spectrale de longueur d'onde λ, au laboratoire, apparaît déplacée vers le rouge d'une quantité $\Delta\lambda$, la vitesse V de fuite est donnée par la formule simple $V = c.\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ (c étant la vitesse de la lumière).

Mais une propriété stupéfiante a été mise en évidence, peu à peu. Non seulement toutes les galaxies semblent s'enfuir, mais la vitesse de cette fuite est proportionnelle à l'éloignement de chaque galaxie. C'est l'astronome Edwin Hubble, du Mont Wilson, qui a énoncé en 1929 cette loi frappante : le décalage du spectre croît comme la distance des objets considérés.

Naturellement, nous retomberions dans un anthropocentrisme naïf en supposant que notre Galaxie est le centre d'une répulsion universelle. En fait, il n'y a pas de centre de répulsion : l'éloignement est mutuel comme celui des taches de couleur à la surface d'un ballon que l'on gonfle. Chaque tache est immobile à la surface du caoutchouc, mais le gonflement du support n'en éloigne pas moins les taches les unes des autres.

Les théoriciens estiment que ce phénomène singulier est la conséquence d'une *expansion de l'Univers* dans son ensemble. Cette expansion est du reste prévue, mise en équation, pour ainsi dire, par la *Relativité générale*, dans ses

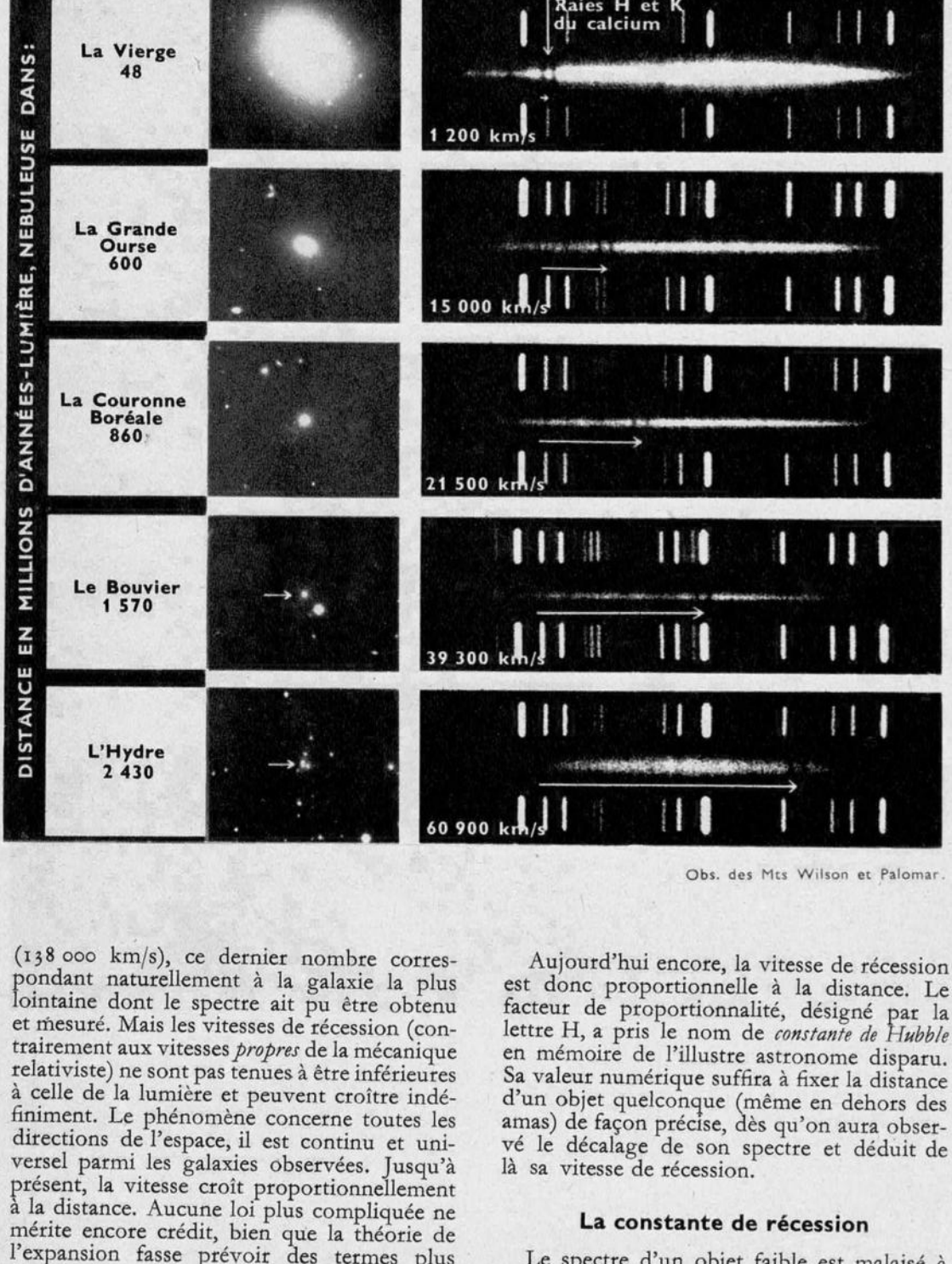


Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

développements cosmologiques tardifs (Friedman, Lemaître, Eddington, De Sitter, Heckmann, Robertson, Tolman, etc.).

Tous les efforts fait depuis 1929 pour interpréter le décalage du spectre des galaxies autrement que par une vitesse de recul se sont révélés vains. Toutefois, il reste un petit nombre d'astronomes hostiles à l'expansion de la métagalaxie (nom que l'on donne parfois à la partie *visible* de l'Univers). Nous attendrons, sans impatience, qu'une présomption, si faible soit-elle, en faveur de l'une des innombrables solutions de rechange qu'ils proposent, apparaisse dans les faits, pour nous en soucier. Cependant, pour bien marquer le caractère nouveau et révolutionnaire de la fuite mutuelle des galaxies, à savoir la *vitesse proportionnelle à la distance*, nous donnerons à cette vitesse le nom de vitesse de *récession*.

Les vitesses de récession actuellement mesurées prennent toutes les valeurs possibles entre zéro (pour les galaxies voisines) et près de la moitié de la vitesse de la lumière



Obs. des Mts Wilson et Palomar.

(138 000 km/s), ce dernier nombre correspondant naturellement à la galaxie la plus lointaine dont le spectre ait pu être obtenu et mesuré. Mais les vitesses de récession (contrairement aux vitesses *propres* de la mécanique relativiste) ne sont pas tenues à être inférieures à celle de la lumière et peuvent croître indéfiniment. Le phénomène concerne toutes les directions de l'espace, il est continu et universel parmi les galaxies observées. Jusqu'à présent, la vitesse croît proportionnellement à la distance. Aucune loi plus compliquée ne mérite encore crédit, bien que la théorie de l'expansion fasse prévoir des termes plus élevés, une *courbure* de la représentation graphique, qui devra devenir sensible quand nos regards iront assez loin.

Aujourd'hui encore, la vitesse de récession est donc proportionnelle à la distance. Le facteur de proportionnalité, désigné par la lettre H, a pris le nom de *constante de Hubble* en mémoire de l'illustre astronome disparu. Sa valeur numérique suffira à fixer la distance d'un objet quelconque (même en dehors des amas) de façon précise, dès qu'on aura observé le décalage de son spectre et déduit de là sa vitesse de récession.

La constante de récession

Le spectre d'un objet faible est malaisé à obtenir : mais la valeur du décalage et par suite de la vitesse de récession en résulte avec précision (à moins de 1/1000 près dans le cas

Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

← Le décalage des spectres vers le rouge et la fuite des galaxies

Sur ces spectres de cinq galaxies photographiées par Humason, des flèches indiquent le décalage des raies spectrales (raies H et K du calcium très nettes), d'où se déduit la vitesse de récession de l'objet observé. Les distances ont été calculées en admettant pour la constante de proportionnalité entre la vitesse de récession et la distance (constante de Hubble) 25 km par seconde et par million d'années-lumière.

des grandes vitesses, où les autres causes de variation de la longueur d'onde sont négligeables en regard de la récession). L'astronome Humason a été le principal observateur des décalages, donc des vitesses : son nom doit donc être associé à celui de Hubble, qui assuma la tâche plus difficile d'évaluer les distances.

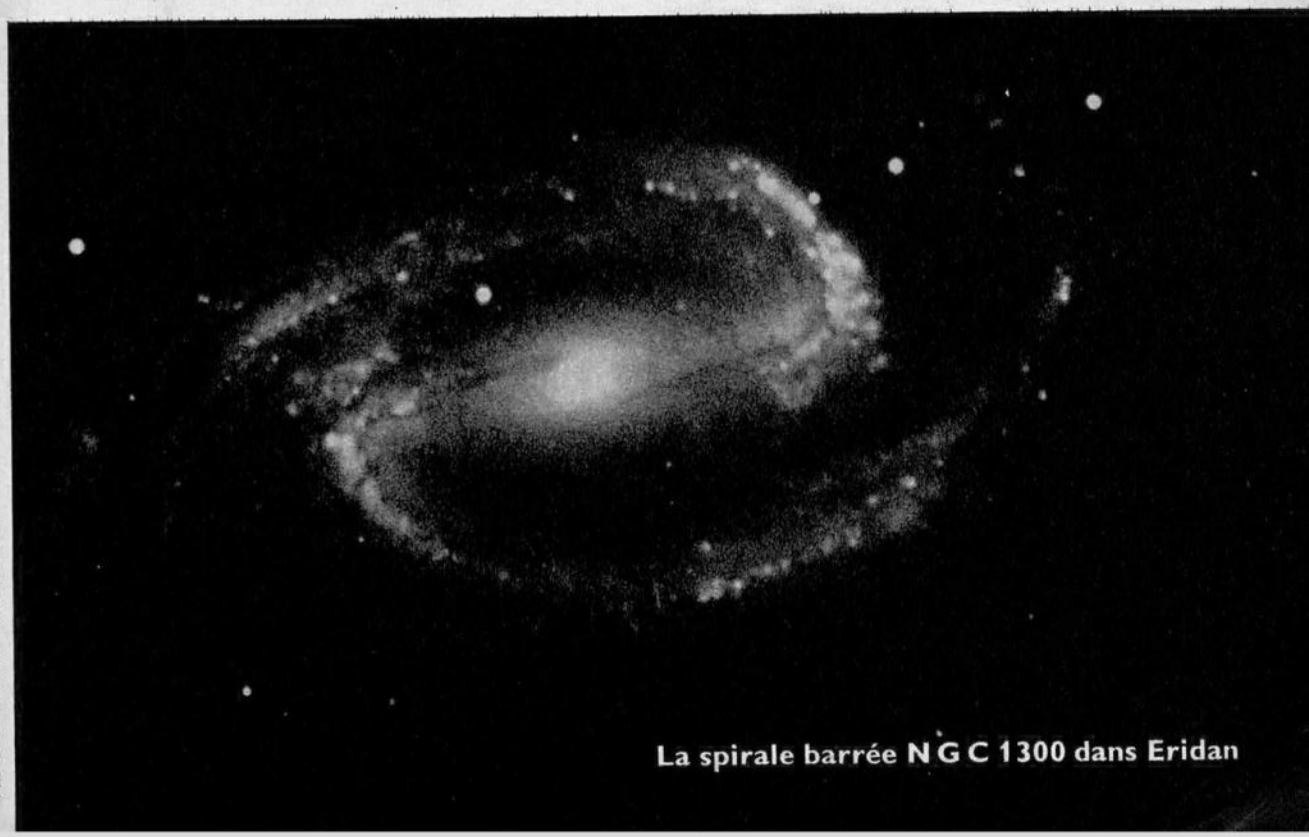
Si H était bien connu, les distances s'obtiendraient sans ambiguïté. Malheureusement la valeur de H a subi depuis 1952 des variations importantes qui n'ont pu étonner que les profanes, surtout ceux pour qui le nom d'astronomie demeure associé à l'idée de science parfaite, donc de science fossile, *ne varietur*. Le problème de la détermination de H est sans doute le plus difficile de l'astrophysique contemporaine.

La valeur de H demeure encore assez incertaine à l'heure qu'il est, et le demeurera tant que n'auront pas été achevés les travaux de longue haleine portant sur le calibrage des étoiles standard, sur l'étude des galaxies voisines de la nôtre, et sur l'analyse dynamique de quelques grands amas comme l'amas Virgo ou l'amas Coma.

C'est donc avec quelque réserve que l'on suggérera la valeur suivante, qui semble plausible aujourd'hui : H = 25 *km par seconde, par million d'années-lumière*. Si l'on admet cette constante, il suffit de diviser par 25 la vitesse de récession d'une galaxie quelconque (en km/s) pour avoir sa distance en millions d'années-lumière. Exemple : les galaxies qui s'enfuient à raison de 150 000 km/s se trouvent à 150 000 : 25 = 6 000 millions d'années-lumière. Telle est la limite des investigations actuelles.

L'histoire de la découverte de l'amas de galaxies qui détient le record de distance mérite qu'on s'y attarde un peu : elle illustre la collaboration à une même fin de disciplines dissemblables.

Parmi les dizaines de milliers d'amas que la photographie directe (dans le « Sky Atlas » californien) a permis de recenser et dont les galaxies maximales sont de 20e grandeur environ, il est impossible de choisir *a priori* ceux dont une étude spectrographique révélerait l'éloignement extrême. Étude spectrographique que peut mener à bien, seul (à moins que l'on utilise la caméra électronique, laquelle permettra d'obtenir le même résul-



La spirale barrée N G C 1300 dans Eridan

Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

Ph. Obs. des Mts Wilson et Palomar.

tat avec des télescopes beaucoup plus petits), le télescope de 5 m de diamètre du Mont Palomar, et qui exige, même avec une toute petite dispersion, plus de 10 heures de pose sur des objets que l'œil ne voit pas directement. On ne peut exécuter ce travail au hasard sans qu'un indice préalable soit favorable à l'entreprise.

Ici l'indice favorable fut apporté par la radioastronomie. Il existe en effet des *radiogalaxies* dont le rayonnement radio est de plusieurs ordres de grandeur supérieur au rayonnement des galaxies normales, comme notre Galaxie ou la nébuleuse d'Andromède.

Les instruments actuels permettent déjà d'en détecter plusieurs milliers. La plus intense d'entre elles, située dans la constellation du Cygne, a pu être identifiée à une galaxie de 17e magnitude, donc déjà très faible, et située à 600 millions d'années-lumière. Ceci fait entrevoir la difficulté du problème d'identification des radiosources. L'objet optique correspondant est très éloigné et très peu lumineux : la plupart de ces radiogalaxies correspondent même à des objets situés au delà de la portée du plus grand des télescopes optiques, celui du Mont Palomar.

Une autre difficulté provient de la diffé-

← Une radiosource très intense

Elle se trouve dans la constellation du Cygne, séparée de nous par une distance de 600 millions d'années-lumière. Son image optique fait penser à deux galaxies en collision, déformées par l'attraction mutuelle, mais cette interprétation a été abandonnée.

rence qui peut exister entre l'aspect optique et l'aspect radio de ces galaxies. Des études très récentes ont pu montrer que la majorité des radiogalaxies se présentent comme des sources doubles dont les dimensions et la séparation sont souvent 10 à 100 fois supérieures aux dimensions de la galaxie visible.

Cela explique qu'une douzaine à peine de radiogalaxies aient pu être identifiées avec des galaxies visibles. On n'a pas encore découvert à ces galaxies de caractère commun qui puisse expliquer leur forte émission radio. Leur aspect optique diffère considérablement d'un cas à l'autre. Certaines sont des galaxies elliptiques ne présentant aucun caractère remarquable; d'autres des galaxies à double noyau, ce qui a pu faire penser que l'on assistait à la collision de deux galaxies; d'autres, enfin, des galaxies présentant une anomalie visible, comme M87, dans la constellation de la Vierge, galaxie elliptique du noyau de laquelle part un jet de lumière bleue très brillant.

En 1959, des radioastronomes signalèrent une radiosource dans la constellation du Bouvier — nommée 3 C 295 — à laquelle nul objet perceptible en optique ne semblait correspondre. Son intensité radio était seulement 1/100 de celle de Cassiopée A, donc très facilement détectable même avec des petits radiotélescopes. Une photo à longue pose, au Mont Palomar, révéla, dans la position indiquée, un amas d'une soixantaine de galaxies de 21e grandeur, à peine discernables comme des ombres grises sur le voile de fond du cliché. L'objet maximum, de magnitude 20,9, semblait être la radiosource cherchée. Alors on se décida à tenter d'obtenir le spectre de cette lumière infime, un million de fois plus faible que la plus faible des étoiles visibles à l'œil nu ! Dans le spectre chèrement acquis après 12 heures de pose, les raies de l'oxygène O II, normalement situées dans l'ultraviolet à 3 730 angströms, se perçoivent en face de la longueur d'onde terrestre 5 450. Le décalage vers le rouge est de 1 720 angströms. Les décalages usuels en physique sont d'une fraction d'angström et les décalages auxquels les vitesses propres des étoiles nous habituent en astronomie atteignent quelques angströms : on conçoit l'ampleur du phénomène ici enregistré. La vitesse de récession correspondante atteint 0,46 fois celle de la lumière.

Cosmologie et Cosmogonie

Nous avons vu l'Univers connu s'agrandir à mesure que notre anthropocentrisme s'est effacé. Aujourd'hui, le domaine exploré est si vaste que la distinction traditionnelle entre cosmologie et cosmogonie s'efface. La cosmologie est l'étude de l'Univers tel qu'il est aujourd'hui, mais comme la lumière met au moins 6 milliards d'années pour nous arriver des frontières actuelles du domaine observable, cette lumière nous apporte l'image des galaxies les plus lointaines telles qu'elles étaient il y a 6 milliards d'années. Nous ne pouvons donc éviter de voir intervenir le facteur *temps* et *l'évolution* dans nos recherches; nous voyons à la fois des traits du présent et d'autres datant d'un lointain passé. L'image composite

Une galaxie de forme anormale →

La galaxie M-87 a pu être identifiée avec une radiosource intense, Vierge A. Il y a deux composantes : l'une large, correspond au noyau central; l'autre est un jet d'électrons responsable de l'émission radio.

du Monde que nous recevons ne peut avoir de signification que si nous étudions la genèse des systèmes, leur évolution, en même temps que leur distribution dans l'espace. Autrement dit, bon gré, mal gré, en même temps que la cosmologie nous faisons de la cosmogonie, cette partie de l'astronomie que les fantaisies des Anciens, et les élucubrations de quelques modernes, avaient grandement discréditée. La voici remise en honneur, mais avec des observations sûres à la base.

L'âge des astres

Les questions *d'âge* des astres sont désormais au premier plan des recherches. L'âge de la croûte terrestre est bien établi : il avoisine 4,5 milliards d'années. L'âge du Soleil ne dépasse guère 5 milliards d'années, mais le Soleil appartient à une population stellaire, appelée population I, qui fut précédée par beaucoup d'autres dans notre Galaxie. Certaines étoiles du disque galactique (les sous-géantes) ont un âge double de celui du Soleil ; et les amas globulaires, avec leur population II, qui est sans doute primitive, ont un âge environ triple (15 milliards d'années).

Certains ont poussé jusqu'à 25 milliards d'années l'estimation de l'âge de ces amas ; mais la formation initiale d'hélium (de presque tout l'hélium) en deux ou trois milliards d'années, aux premiers stades de l'évolution de la Galaxie, au sein d'étoiles massives qui ont évolué très vite et sont passées au rang de *naines blanches*, réduit considérablement les âges un peu hâtivement calculés.

La Galaxie semble avoir, en dernière analyse, d'après ses amas stellaires les plus vieux, au plus 15 milliards d'années. D'ailleurs, si elle avait un âge beaucoup plus grand, sa rotation ne l'aurait-t-elle pas uniformisée ? Ne serait-elle pas plus homogène que nous la voyons ?

L'inverse de la constante de Hubble, 1/H, représente une durée, T. En divisant la distance d'une galaxie par sa vitesse de récession, nous obtenons le temps mis par ce mobile pour s'écarter de nous à la distance où il se trouve si *la vitesse de récession est demeurée uniforme*.

C'est là une vue simpliste des choses ; la durée en question, si elle n'est pas *l'âge de l'Univers* (il faudrait spéculer sur les variations de la vitesse de récession dans le passé et sur le modèle même de l'Univers), du moins est-elle liée intimement au déroulement des phénomènes. (Dans le modèle d'Einstein-de Sitter, l'âge « vrai » de l'Univers est les 2/3 de T). La valeur 25 que nous avons proposée pour H correspond à T = 13 milliards d'années. La concordance des ordres de grandeur de l'âge de la Galaxie et de T me semble de bon augure. La valeur de H et l'estimation des âges des galaxies pourront varier, mais je tiens pour assuré qu'elles varieront corrélativement.

J'ai écrit le mot de « modèles » de l'Univers. Le XX^e siècle, en astronomie théorique, restera, je pense, comme le siècle des *modèles*. Pour la première fois, l'esprit de l'homme, dans le cadre de la théorie de la Relativité, s'élance vers l'explication des traits généraux du Monde sensible. La première cosmologie d'Einstein fut statique. L'observation a montré que la métagalaxie n'était pas en équilibre, qu'elle était en expansion. Aussitôt les théoriciens ont découvert que la métrique de l'Univers pouvait varier en fontion du temps et que l'espace courbé de la Relativité pouvait prendre des formes variées (elliptique, hyperbolique, ou même pseudoeuclicien). Mais il est évident que la théorie laisse encore de côté beaucoup de paramètres essentiels : la possibilité de rotations absolues dans l'Univers (Heckmann) n'est pas encore exploitée. Devant les modèles actuels, on évoque les tâtonnements antiques de l'homme, cherchant la forme de la Terre et commençant à la mesurer.

La figure de l'Univers

D'un autre côté, l'observation est gravement déficiente. Elle n'a pas encore réussi à nous dire s'il existe en abondance de la matière, sous une forme discrète, entre les galaxies. Or cette matière discrète, répandue dans les abîmes intergalactiques, pourrait l'emporter, et de beaucoup, sur la matière brillante que nous observons. Je ne crois pas qu'on puisse, à un facteur 100 près, déterminer de façon sûre la valeur de la densité moyenne de la matière dans le coin d'espace soumis à notre enquête. Or cette densité est un paramètre essentiel de la figure éventuelle de l'Univers.

Quoi qu'il en soit, ce sera l'honneur de notre époque, par d'autres aspects si décevante, d'avoir ébauché la recherche de modèles susceptibles de donner de l'Univers une image dynamique cohérente.

Je crois que l'édification d'un modèle d'Univers jugé satisfaisant par l'ensemble des astronomes sera longue ; le travail est plus complexe qu'on ne l'avait cru dans l'euphorie des années 1920-1940. Mais la figure de la Terre, depuis Parménide et Eratosthène, qui en esquissèrent les premiers traits, n'est-elle pas encore sur le métier ?

Paul COUDERC
Astronome titulaire de l'Observatoire de Paris

A 45 millions d'années-lumière, la galaxie spirale N G C 3031 dans la Grande Ourse

ASTRONOMIE ET RECHERCHE SPATIALE

C'EST en fonction d'abord des contingences politiques ou militaires que s'est développée la recherche spatiale. Glenn, comme Gagarine ou Titov, sont des soldats, non des astronomes. C'est ensuite et surtout vers l'étude de l'atmosphère terrestre que s'est orienté le développement des fusées et satellites : haute atmosphère, météorologie, environnement spatial, « ceintures de radiations » de Van Allen, etc. Pourtant, de toutes les sciences, celle qui peut apporter le plus à la technique spatiale, celle qui peut en espérer le plus de bouleversements, c'est l'astronomie.

Les astres artificiels

La recherche astronomique spatiale peut s'envisager de deux manières. Tout d'abord, on peut considérer les fusées et surtout les satellites comme des objets astronomiques artificiels. On peut, en somme, pour la première fois, faire de l'astronomie une science expérimentale.

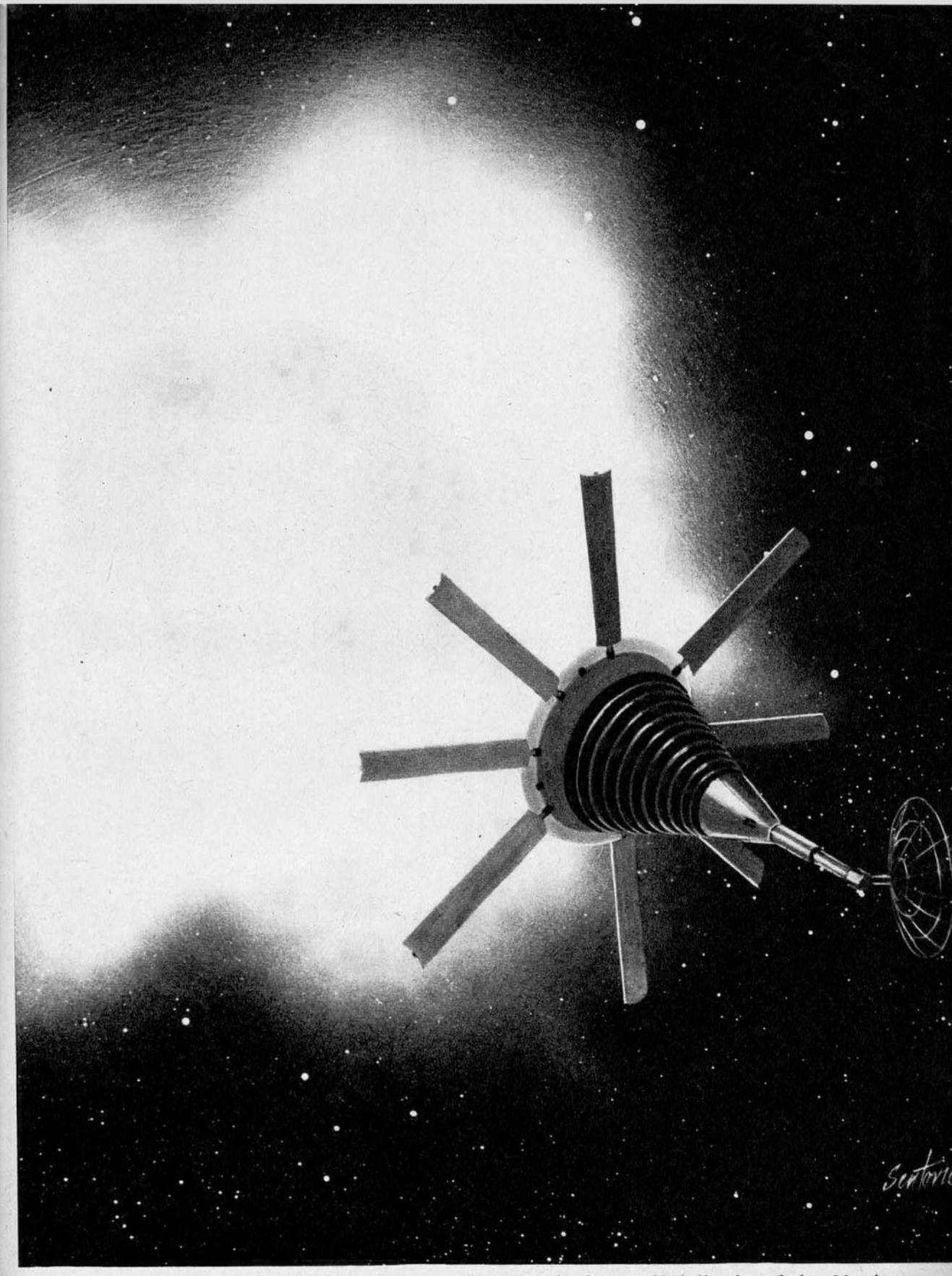
Le mouvement d'un satellite dans l'espace est fixé naturellement par les lois de la mécanique céleste. En principe, il suffit de connaître les conditions initiales pour déterminer ce mouvement. Pourtant, plus que dans le mouvement d'astres vrais, la proximité de la Terre introduit dans celui des satellites artificiels des perturbations : la comparaison des calculs et des prévisions de la mécanique, d'une part, et des observations soigneuses des satellites, d'autre part, permet précisément de déterminer ces perturbations ; leur interprétation fournit des renseignements sur les causes perturbatrices :

— effet du frottement dans les couches les plus élevées de l'atmosphère terrestre qui permet de déterminer la densité de ces couches ; là, c'est à la géophysique que l'astronomie apporte la précision de ses méthodes ;

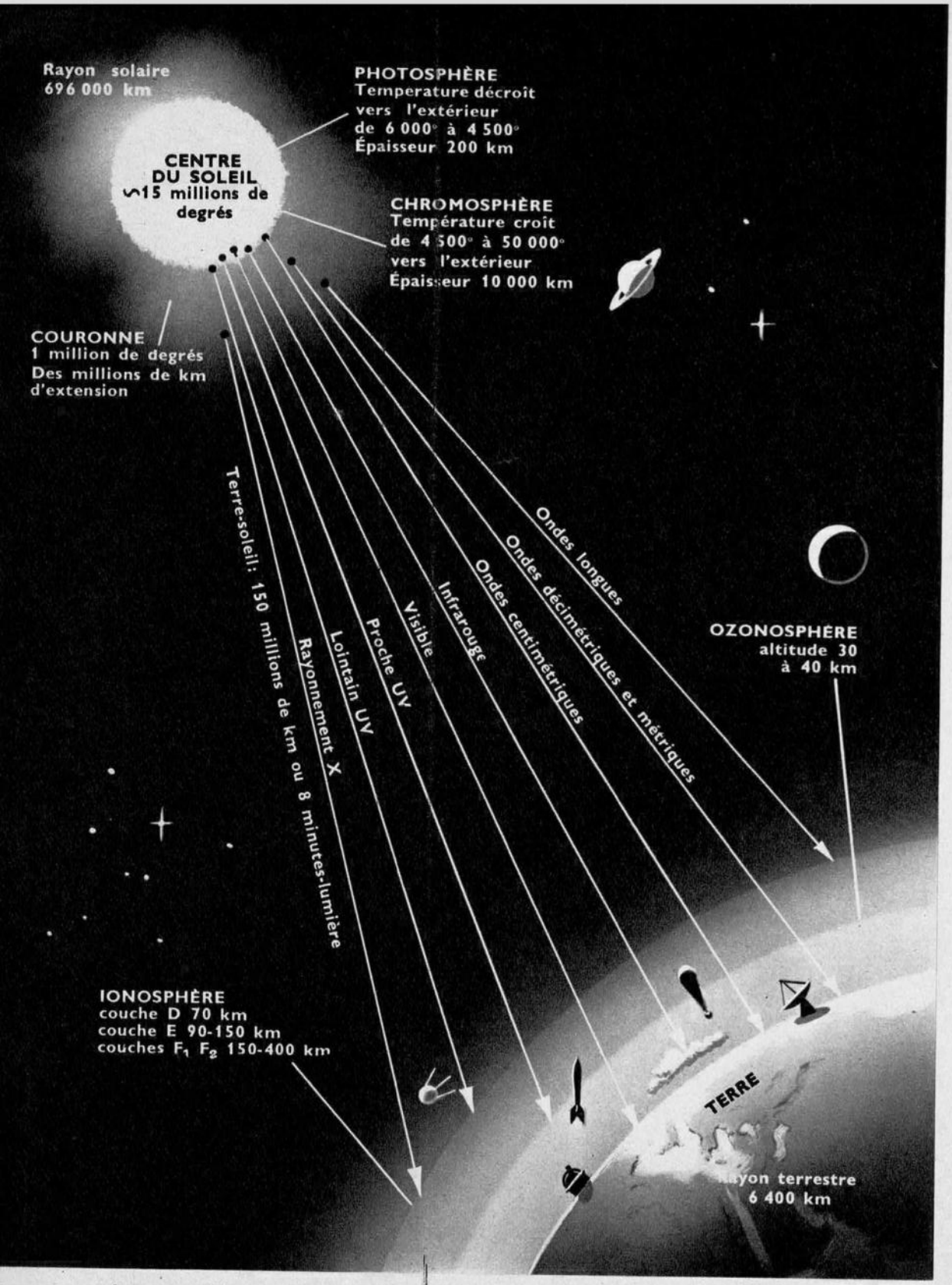
— effet de la pression de radiation : lorsque le satellite est éclairé par le Soleil, il est repoussé ; cette répulsion cesse lorsque le satellite est dans l'ombre de la Terre ;

— effet, enfin, des irrégularités de distribution de la masse terrestre : l'étude du mouvement des satellites géodésiques a permis de déterminer la forme de la Terre, en gros celle d'une poire. A l'aplatissement des

General Dynamics, U.S.A.



Un des nombreux avant-projets de planète artificielle, le « Solar Monitor ».



Les conditions physiques dans les différentes couches solaires et les niveaux de l'atmosphère terrestre où parviennent leurs rayonnements.

pôles, connu depuis les expéditions au pôle et à l'équateur organisées au XVIIIe siècle (l'Académie des sciences avait envoyé Maupertuis en Laponie, et La Condamine au Pérou pour y mesurer des arcs de méridiens), se superpose, en effet, une déformation de l'équateur. La géodésie, science sœur de l'astronomie par ses méthodes et ses besoins d'extrême précision, progresse maintenant grâce à l'astronomie spatiale.

Ces recherches d'astronomie pure sur les astres artificiels sont complétées par la création d'astres artificiels aux propriétés physiques particulières : ce n'est plus l'étude de leur mouvement, mais celle de leur *comportement* qui, désormais, nous intéressera. C'est ainsi que, dès 1946, Zwicky entreprenait des expériences destinées à créer des pluies de météores artificiels. Plus récemment, Swings a proposé la réalisation d'une comète artificielle. Un bloc de glace serait lancé à quelques centaines de kilomètres d'altitude. Sa dégazéification progressive sous l'influence de la chaleur solaire permettrait à la « queue cométaire » de se former. Son étude spectrographique fournirait alors des arguments décisifs à l'étude des comètes. Par retouches successives, on arriverait peut-être à créer une comète artificielle dont le spectre serait identique à celui d'une comète réelle. Comme on en connaîtrait la composition, et les propriétés, on connaîtrait automatiquement celle de la comète réelle. Cette expérience est prévue au programme de l'organisation européenne de recherches spatiales. Elle relève de l'astrophysique expérimentale.

Les observatoires de l'espace

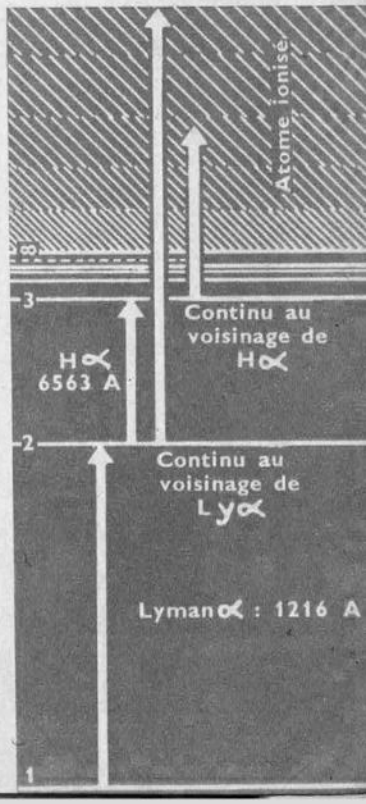
D'une plus grande importance encore sont les recherches nouvelles que permet l'utilisation d'instruments portés par des fusées et des satellites, ou — c'est pour bientôt — d'observatoires sur la Lune. En effet, l'observation depuis le sol de la Terre, même quand il s'agit de stations de montagne, est fâcheusement limitée par l'atmosphère terrestre, cela de plusieurs façons.

Tout d'abord, l'atmosphère terrestre est *diffusante*.

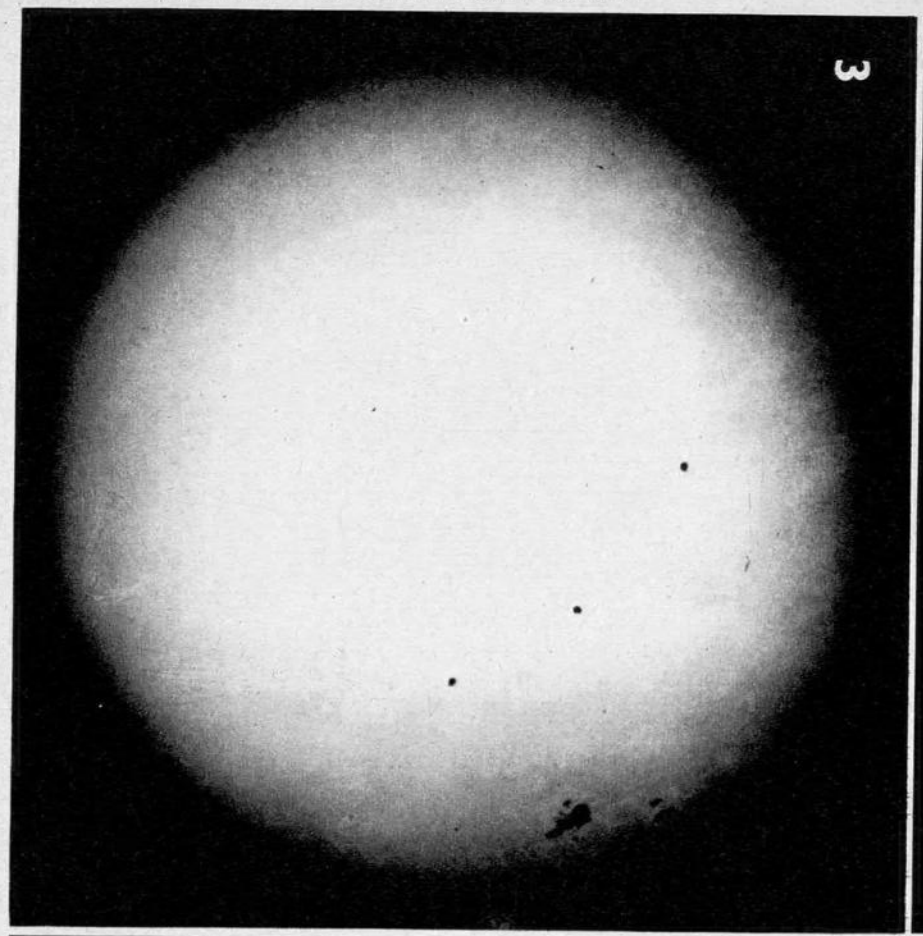
On sait que la lumière du Soleil, lorsqu'elle illumine les molécules de l'air atmosphérique, est diffusée dans toutes les directions par ces molécules ; c'est l'origine du « bleu » du ciel. Cette lumière diffusée est suffisamment intense, en plein jour, pour nous cacher les étoiles. Ce n'est pas très grave car on peut observer les étoiles la nuit. Mais surtout, elle nous cache la couronne solaire, cette zone ténue, très chaude, qui entoure le Soleil et dont le rayonnement propre est de l'ordre de un millième de celui du ciel bleu normal. Et l'on est limité, pour l'observation de la couronne, aux quelques minutes (par an) des éclipses totales de Soleil, observables seulement de certaines régions privilégiées de la

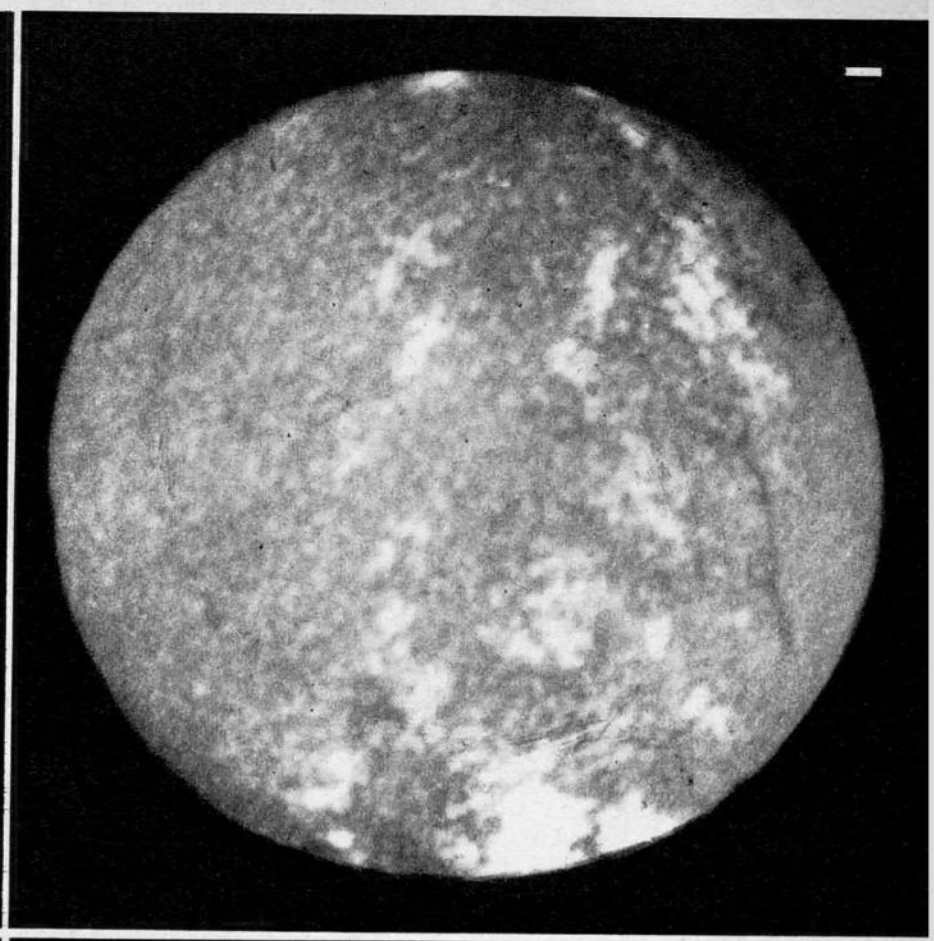
Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

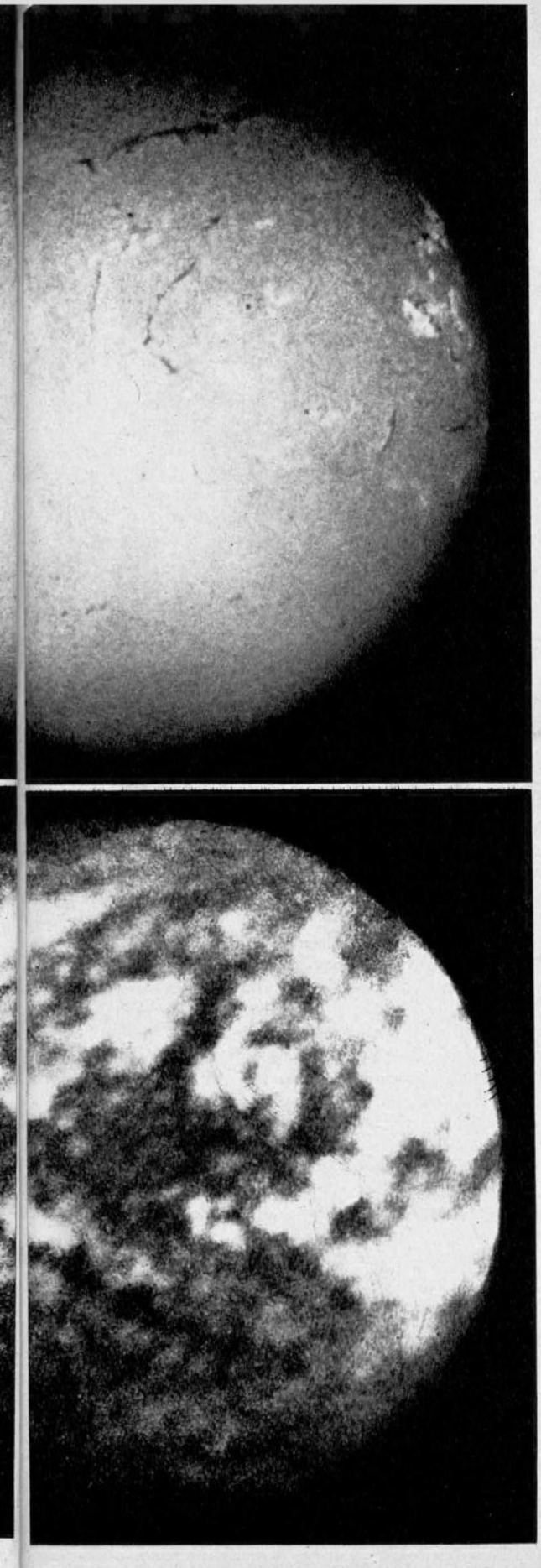
L'ATOME d'hydrogène comporte un seul électron qui gravite autour du noyau (proton). Cet électron peut occuper plusieurs « niveaux » d'énergie, ici schématiquement représentés. Un rayonnement incident peut être absorbé par l'atome et son énergie transmise à l'électron qui passe alors d'un niveau à un niveau supérieur. Le passage d'un électron du niveau 1 au niveau 2 correspond à l'absorption de la raie Lyman alpha ; les autres raies de Lyman correspondent au passage de 1 (niveau fondamental) à 3, 4... De même, les raies de Balmer correspondent au passage de 2 à 3 (raie Hα), 4... Si l'énergie du rayonnement incident est suffisante, l'électron pourra être arraché et prendre une énergie quelconque, d'où formation d'un spectre continu. La longueur d'onde du rayonnement absorbé est inversement proportionnelle à l'énergie acquise par l'électron. Elle est de 1216 A pour Lyα, 1026 A pour Ly β, ... Le « continu » de Lyman est absorbé à toutes les longueurs d'onde inférieures à 912 A et celui de Balmer au-dessous de 3646 A. Il en résulte qu'à 1216 A, par exemple, on observera la raie Ly α (transition 1-2) et le continu de Balmer (transition 2-continu). Inversement, à la recombinaison d'un électron libre avec un proton correspond l'émission d'un spectre continu ; au passage d'un électron d'un niveau à un niveau inférieur, l'émission d'une radiation monochromatique. Ceci explique l'allure générale du spectre d'un astre (continu et raies) : il dépend non seulement de la nature des atomes (hydrogène, hélium, etc.), mais aussi de leur température d'excitation (qui fixe statistiquement la proportion des atomes ayant des électrons sur tel ou tel niveau) et de la variation de cette température avec la profondeur dans l'atmosphère stellaire qui détermine l'importance respective de l'émission et de l'absorption avec spectre de raies brillantes ou obscures suivant que la température croît ou décroît vers l'extérieur.



Photos Observatoire McMath-Hulbert et Naval Research Laboratory







Terre, celles qui, privées de la lumière solaire directe par l'ombre de la Lune, se trouvent, en plein jour, dans des conditions « nocturnes ».

La recherche spatiale, en s'affranchissant de cette couche diffusante, permettra, en plein jour, l'étude de la couronne et celle des étoiles. Pour ce faire, il n'est pas nécessaire de se servir de fusées ni même de satellites. A 20 km d'altitude, à portée des ballons, l'atmosphère n'est plus assez diffusante pour être réellement gênante. Le programme français de l'Année du Soleil Calme (1964-1965) comporte précisément des études régulières de la couronne en ballon, qui seront menées par A. Dollfus.

Ensuite, l'atmosphère a une *radiation propre*. Même la nuit, on ne peut observer les moins brillants des astres car les régions les plus élevées de l'atmosphère émettent un rayonnement (rayonnement du ciel nocturne) dû à la recombinaison nocturne des électrons de l'ionosphère et des atomes ionisés se trouvant dans ces mêmes régions. Ce rayonnement du ciel nocturne est la principale cause de limitation dans l'exploration lointaine de l'Univers : les astres très faibles (c'est-à-dire les plus lointaines des galaxies) sont, en effet, tout à fait camouflés par cette luminescence parasite. Là, ce n'est pas par des ballons que l'on pourra résoudre les problèmes; il faudra monter beaucoup plus haut : l'exploration des confins de l'Univers est typiquement un problème pour les observatoires sur la Lune.

L'atmosphère est sans cesse agitée de mouvements turbulents : c'est *l'agitation atmosphérique*. Les étoiles scintillent, les images télescopiques des objets célestes sont agitées sans cesse par la réfraction parasite due à ces mouvements, la finesse des observations s'en trouve considérablement limitée. On a vu précédemment que, même dans des observatoires privilégiés et par les nuits les plus favorables, on ne peut « séparer » deux points du ciel aussi bien que le permettrait théoriquement le diamètre des grands instruments

← Quatre photographies du Soleil

Elles ont été prises presque simultanément le même jour (13 mars 1959). En 1, c'est un spectrohéliogramme dans la raie K du calcium ; en 2, un spectrohéliogramme dans la raie H alpha de l'hydrogène ; 3 est un cliché classique en lumière blanche. Ces trois photographies ont été réalisées dans des observatoires au sol. La quatrième, dans la raie Lyman alpha de l'hydrogène, a été obtenue à l'aide d'une caméra spéciale emportée par une fusée ionosphérique Aerobee-Hi. On y voit les filaments chromosphériques et les plages faculaires. Le premier document de ce genre, de moins bonne qualité, avait été obtenu dès 1955 par Rense.

terrestres. Un télescope de 6 m de diamètre établi sur la Lune aurait un pouvoir séparateur utile près de dix fois meilleur que celui des instruments terrestres les plus puissants et permettrait des mesures de positions d'étoiles d'une qualité sans égale. Il n'est pas douteux que des observations faites à partir de ballons équipés de grands télescopes conduiraient déjà à de très grands progrès (mesure des étoiles doubles très serrées, photographie très détaillée des planètes, etc.).

Enfin, et l'astrophysicien aura tendance à dire surtout, l'atmosphère interdit l'accès des observatoires terrestres à la plupart des rayonnements ou des corpuscules qui nous parviennent du Soleil, supprimant ainsi une partie essentielle de l'information. Et, en vérité, c'est là le point important, la partie du rayonnement arrêtée par l'atmosphère terrestre est précisément celle qui nous apporterait, et de loin, le plus d'information sur la structure des atmosphères stellaires (et du Soleil en particulier). C'est en s'affranchissant de cette *opacité sélective* de l'atmosphère que l'astronomie spatiale pourra nous fournir le plus de données nouvelles.

L'atmosphère-écran

Les rayonnements électromagnétiques sont caractérisés par leur longueur d'onde. On a vu que seuls parviennent au sol les rayonnements visibles (de 4 000 à 8 000 Å) une faible partie des rayonnements ultraviolets (de 3 400 à 4000 Å) ou infrarouges (de 8000 Å à 20 μ environ, avec des zones d'opacité complète entre ces deux longueurs d'onde). Parviennent aussi les rayonnements de la radioastronomie entre 1 mm et 20 ou 30 m de longueur d'onde. En revanche, les rayonnements suivants sont absorbés :

— l'extrême rayonnement X (de 1 à 100 Å), par les couches de l'ionosphère (azote et oxygène moléculaires);

— le rayonnement ultraviolet extrême (de 100 à 1 800 Å environ), par les couches les plus basses de l'atmosphère (oxygène atomique);

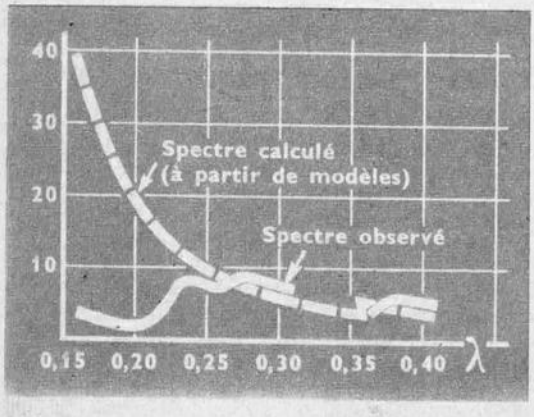
— le rayonnement ultraviolet proche (de 1 800 à 3 000 Å environ) par l'ozonosphère, vers 40 km d'altitude;

— le rayonnement infrarouge (dans certaines zones au-dessous de 20 μ, puis de 20 μ à 1 mm) par la vapeur d'eau et le gaz carbonique, principalement dans les 10 km de la basse atmosphère;

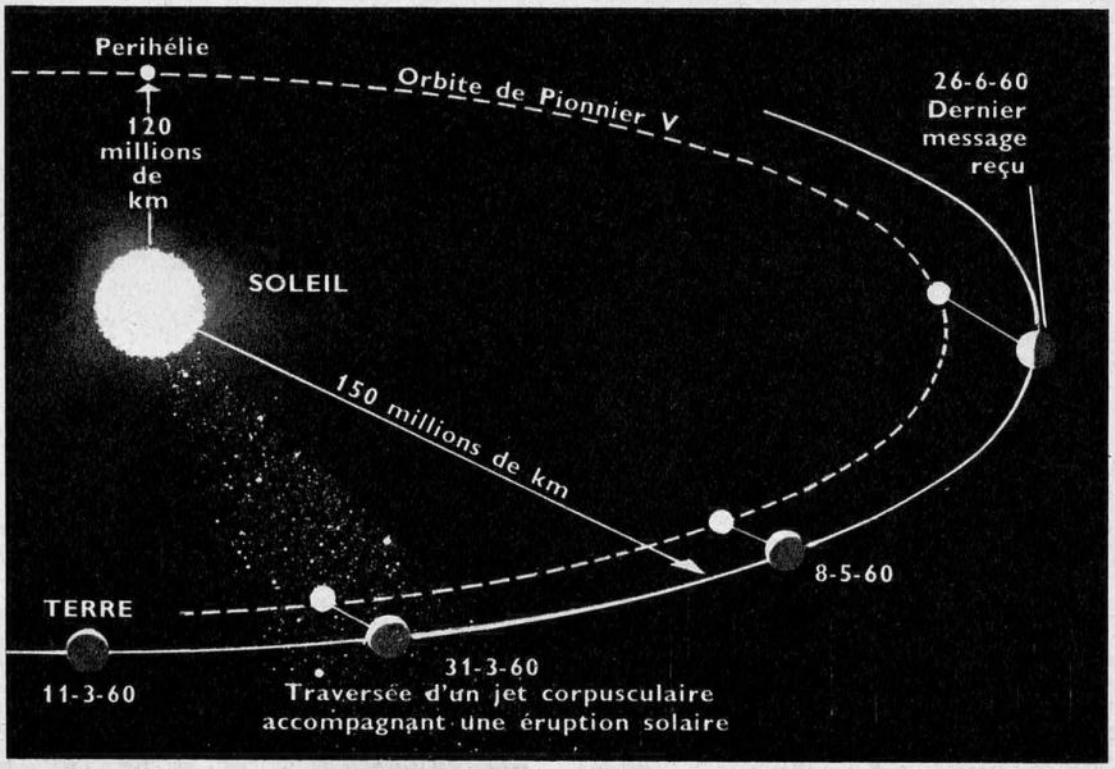
— le rayonnement de longueur d'onde supérieure à 20 ou 30 m, qui se réfléchit sur l'ionosphère.

De tous ces rayonnements, c'est le rayonnement de courte longueur d'onde qui est le plus intéressant. En effet, il constitue un *thermomètre* remarquable, l'intensité du rayonnement étant d'autant plus sensible à la température que la longueur d'onde est plus courte : ainsi, un corps à 5 000° rayonne 1,85 fois plus qu'un corps à 4 500°, dans le jaune. Dans la région 1 000 Å, il rayonne 50 fois plus; 10^{14} fois plus si l'on se trouve dans le domaine X, à 100 Å par exemple. Cette propriété a plusieurs effets évidents. Tout d'abord, si certaines régions chaudes, même de petite dimension, se trouvent sur le Soleil, leur rayonnement passera inaperçu dans le domaine visible, mais écrasera le rayonnement du reste du Soleil dans les courtes longueurs d'onde : ce sera le cas des éruptions solaires et des régions actives de la couronne. De plus, le rayonnement de la couronne (qui est grande, mais transparente dans le domaine visible) sera largement prédominant; enfin, la moindre trace d'activité étant observable, le rayonnement du Soleil dans le domaine X sera perpétuellement changeant et dans de très larges proportions. Le rayonnement de courte longueur d'onde est donc le rayonnement idéal pour l'étude de l'activité solaire.

Il n'en faut pas pour autant négliger le rayonnement infrarouge : c'est à l'aide de ballons que l'on peut espérer l'étudier le mieux. Il devrait nous fournir des renseignements sur certaines couches du Soleil, intermédiaires entre les couches profondes de la photosphère et les couches actives de la chromosphère.



← **LE SPECTRE D'UNE ÉTOILE** (étoile ε du Grand Chien), tel qu'il a été relevé d'après des observations à partir de fusées, correspond à la courbe en trait plein. L'écart est considérable dans l'ultraviolet par rapport au spectre calculé. Il semble qu'il s'agisse d'une forte absorption de ce rayonnement due à des poussières qui envelopperaient l'étoile.



Le vol spatial de Pionnier V

Mis sur orbite autour du Soleil le 11 mars 1960, Pionnier V était spécialement équipé pour l'étude des rayonnements et la mesure, en intensité et direction, des champs magnétiques. On lui doit des renseignements précieux sur la constitution d'un jet de particules solaires qu'il a traversé 20 jours environ après son lancement.

Le soleil aux courtes longueurs d'ondes

L'apparence d'un objet à une longueur d'onde donnée résulte d'une part de sa température (plus l'objet est chaud, plus il est brillant), mais aussi de son opacité (plus il est opaque, plus il est brillant). Pour prédire l'aspect du Soleil à une longueur d'onde donnée, ou son spectre, il importe de connaître la variation, avec la longueur d'onde, de l'opacité des différentes couches aussi bien que leur température. La figure page 148 rassemble les données relatives aux conditions physiques dans les différentes couches et explique, par le jeu des opacités (solaire et terrestre), à quels niveaux de l'atmosphère terrestre les diverses régions de l'atmosphère solaire peuvent être observées. Il est curieux de noter que c'est dans le domaine visible que ces deux atmosphères sont les plus transparentes : du sol, on peut observer les régions les plus profondes de l'atmosphère solaire, ceci vers 4 000 Å de longueur d'onde. Plus on va vers de courtes longueurs d'ondes, et plus la région observée se trouve vers l'extérieur. Ainsi l'étude des raies situées dans l'ultraviolet lointain et le domaine des rayons X nous renseignera sur la constitution des couches extérieures du Soleil, chromosphère et couronne.

Depuis 10 ans, grâce à l'emploi des fusées, il a été possible de dresser la carte complète du spectre ultraviolet et X du Soleil. Des milliers de raies photosphériques, coronales, chromosphériques y ont été identifiées. Parmi les plus intéressantes figurent les raies de Lyman de l'hydrogène (notamment Lyman α à 1 216 Å), d'origine chromosphérique; les raies de l'hélium neutre et ionisé (notamment à 304 et 584 Å), les raies de résonance du magnésium ionisé (à 2 795 et 2 803 Å) qui nous renseignent sur la transition chromosphère-photosphère; et de très nombreuses raies coronales d'éléments très fortement ionisés.

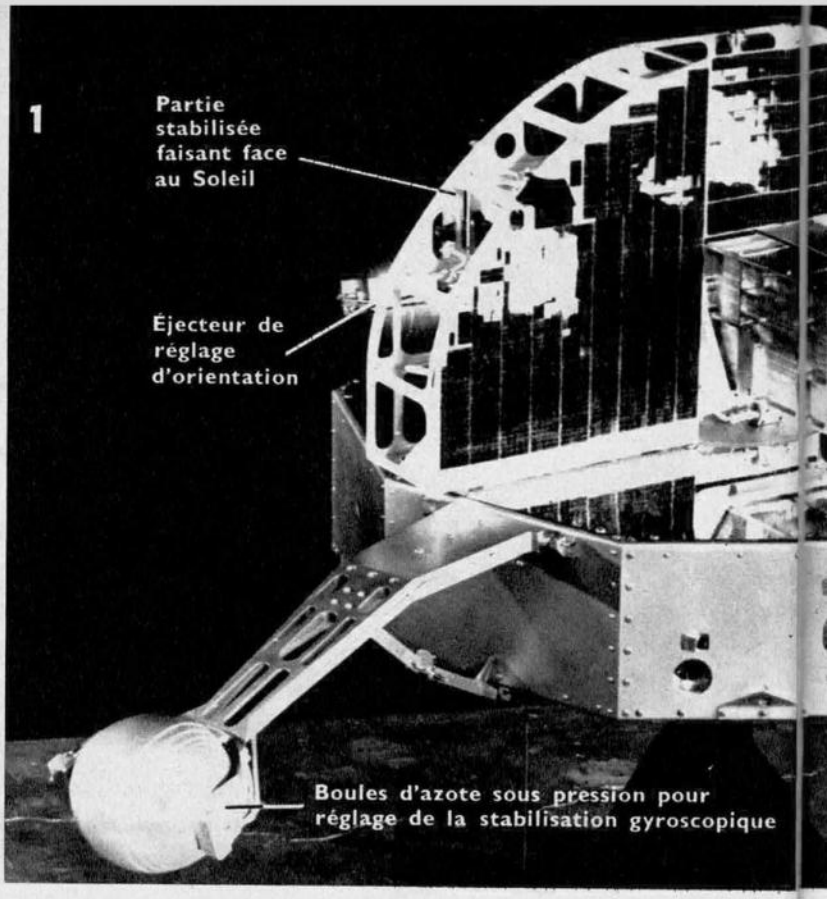
Il a même été possible de faire des images du Soleil dans certains rayonnements particuliers, Lyman α ou rayonnements X. Seules les zones actives apparaissent avec un éclat notable dans ces courtes longueurs d'onde, comme on pouvait le prévoir.

1 Un satellite artificiel étudie le Soleil

C'est l'« Orbiting Solar Observatory » (O.S.O.) que la National Aeronautics and Space Administration (N.A.S.A.) a mis, en mars 1962, sur une orbite circulaire autour de la Terre, à quelque 600 km d'altitude. Son poids est de l'ordre de 200 kg et sa vie utile était estimée à six mois. Il a pour mission principale de mesurer et d'analyser en permanence le rayonnement qu'il reçoit du Soleil, en particulier dans le domaine des très courtes longueurs d'onde, ultraviolet, rayons X et rayons gamma, et des jets de particules ionisées.

2 Observatoire astronomique satellisé

Les savants américains vont faire lancer prochainement un satellite astronomique, l'« Orbiting Astronomical Observatory » (O.A.O.). Il doit emporter, sur une orbite circulaire située à 800 km au-dessus du sol terrestre, un télescope dont l'ouverture atteindra presque un mètre.

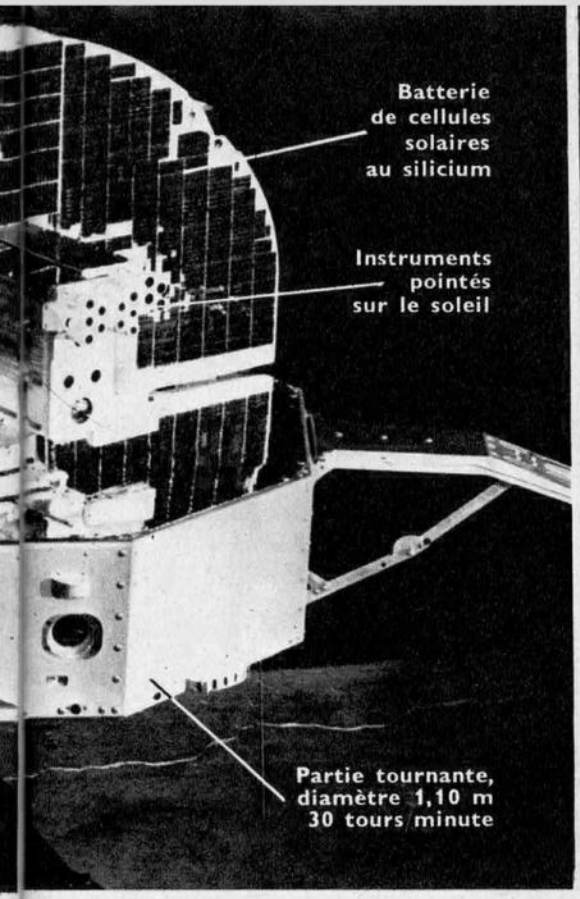


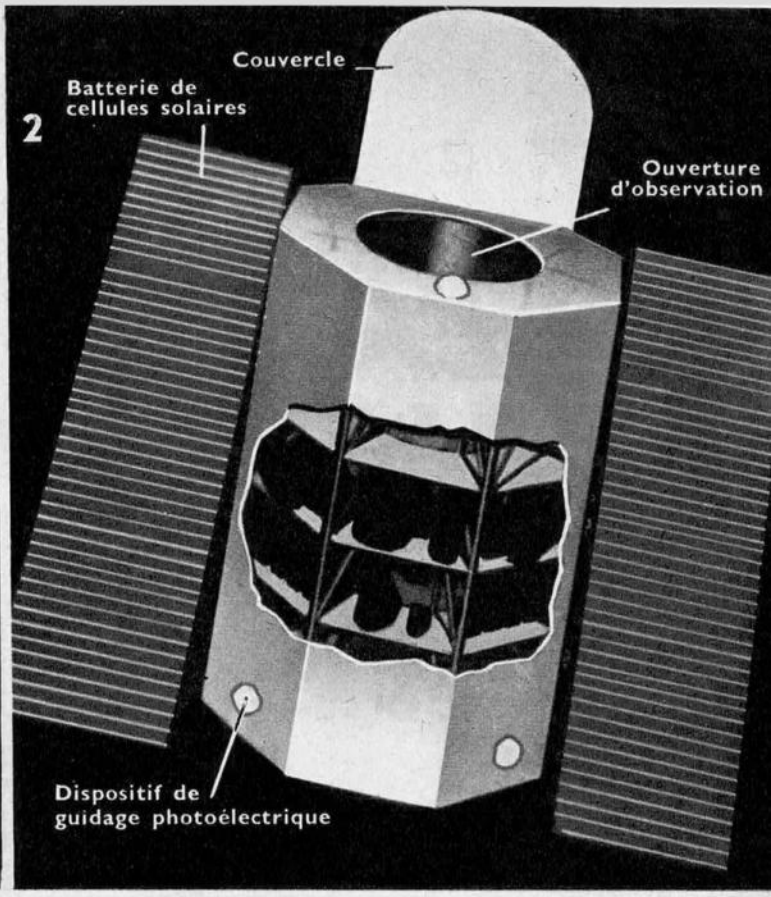
Ciel ultraviolet

Pour des raisons techniques évidentes, il est plus difficile d'observer les étoiles et le ciel que le Soleil, pour lequel on dispose toujours d'une quantité suffisante de lumière. Pourtant, si fragmentaires que soient ces observations non solaires à partir de fusées, elles ont déjà bouleversé notre connaissance de l'univers stellaire.

Le premier vol effectué dans le but d'étudier le ciel a permis de mettre en évidence sept régions du ciel présentant une forte brillance, vers 1 300 Å de longueur d'onde. Ces « nébulosités » apparaissent autour des étoiles les plus chaudes, les étoiles O d'Orion et α de la Vierge par exemple. Leur interprétation est encore très douteuse : s'agit-il de véritables nébulosités très étendues, ou bien simplement d'effets anormaux de diffusion par le milieu interstellaire interposé entre ces étoiles et les observateurs ?

Plus importants encore sont sans doute les résultats des vols suivants. Ils ont, en effet, permis de montrer que vers 2 000 Å le flux lumineux des étoiles chaudes est 30 fois plus petit que le flux que la théorie des atmosphères stellaires, dans son état actuel, ne permet de le prévoir. Cet effet diminue régulièrement quand on se déplace vers les étoiles plus froides. Sur quelques-unes des étoiles étudiées, il a été possible d'étudier le spectre ultraviolet entre 2 000 et 4 000 Å. L'absorption en question commence vers 2 600 Å et prend toute son ampleur à 2 200; elle est très abrupte, comme le montre la figure page 152. Quelle peut être l'origine de ce phénomène aux conséquences considérables ? S'agit-il d'une absorption par quelque molécule jusqu'à présent inconnue, et plus abondante dans les étoiles chaudes ? On peut, en effet, penser aux molécules ionisées résultant de la combinaison des ions (très abondants dans les étoiles chaudes) que sont les protons et les atomes d'hélium une fois ionisés. Il ne semble pas, malheureusement, que la physique quantique nous laisse cette possibilité. Peut-on, au contraire, songer à une absorption par le milieu interstellaire ? Cela ne semble pas plus vraisemblable, car alors l'effet ne devrait pas dépendre du type spectral de l'étoile considérée; il devrait être le même pour les étoiles froides et les étoiles chaudes. C'est pour cette raison que l'on a été conduit à chercher plutôt une interprétation du côté des enveloppes circumstellaires de poussières. Sous l'influence con-





juguée des champs de gravitation et de la répulsion par la radiation stellaire, les particules de poussières sont triées; les plus petites sont chassées dans l'espace; les autres gravitent autour de l'étoile; les plus lourdes d'entre elles s'en approchent beaucoup et sont volatilisées. On peut alors montrer que les particules qui restent absorbent précisément les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 2 400 Å environ; la masse absorbante est sans doute assez considérable.

Corpuscules, rayons cosmiques...

L'atmosphère terrestre est aussi gênante, nous l'avons dit, lorsqu'il s'agit d'étudier les particules issues du Soleil, ou en provenance de la galaxie. Les particules primaires, en effet, à leur arrivée dans l'atmosphère, provoquent des phénomènes secondaires (par exemple les grandes gerbes cosmiques produites par les particules de grande énergie, ou les effets géomagnétiques des jets d'électrons et de protons), et ne peuvent être observées directement. Les études de rayons cosmiques primaires au moyen de fusées ne se comptent plus. Mieux encore, les fusées-sondes extra-terrestres, véritables planètes artificielles, ont traversé des jets de particules solaires : elles ont permis de résoudre un problème qui attendait depuis longtemps sa solution : celui de l'origine des variations du géomagnétisme. En effet, on a pu mesurer le champ magnétique au sein de ce nuage : il est tel que l'on pense maintenant que les nuages de corpuscules issus du Soleil « véhiculent » le champ magnétique qu'ils entraînent jusqu'à l'atmosphère terrestre. Ce fut l'un des intérêts majeurs du vol de Pionnier V que de résoudre ce problème essentiel.

L'astrophysique de demain deviendra de plus en plus spatiale, n'en doutons pas. L'O.S.O. (Orbiting Solar Observatory) est en orbite depuis le mois de mars. L'O.A.O. (Orbiting Astronomical Observatory) sera bientôt lancé, avec son télescope de 1 m de diamètre. Et d'ici quelques années ce sera l'observatoire sur la Lune. Nos conceptions de l'univers s'en trouveront certainement bouleversées. Nous sommes dans la situation d'un convalescent claustré dans sa chambre, à qui l'on ouvre brutalement la fenêtre-atmosphère pour le précipiter dans la Nature.

Jean-Claude Pecker
Astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris

LA VIE DANS L'UNIVERS

NOUS avons vu que la vie existe presque certainement sur Mars. Si cette planète et la Terre, qui évoluèrent différemment depuis le début de leur formation, ont toutes deux donné naissance à la vie, c'est que l'apparition de celle-ci n'est pas un phénomène dû à un hasard extraordinaire, mais que ce phénomène se produit dès que certaines conditions, sans doute moins rares qu'on ne l'a parfois supposé, se trouvent réunies.

Par vie, il ne faut pas entendre, bien sûr, uniquement les formes de la vie terrestre que nous connaissons. L'exemple de Mars nous confirme que des formes de vie peuvent être adaptées à des conditions sensiblement différentes de celles qui régnent sur notre globe, et doivent donc s'écarter des formes de la vie terrestre, au moins par certains côtés. Cependant on admet à l'heure actuelle que toutes les formes de vie ont ceci en commun qu'elles sont nécessairement basées sur la chimie du carbone, en raison de l'aptitude unique que possède ce corps à former des composés extrêmement complexes où il entre en combinaison avec lui-même. Ceci permet d'écarter comme planètes impropres à la vie celles dont la surface est portée à une température supérieure à + 100° C environ (au delà de cette température, l'édifice moléculaire de la plupart des composés organiques complexes se dissocie), ou au contraire à une température très basse (car l'activité biologique, liée à la vitesse des réactions chimiques, diminue considérablement avec le froid).

Ces considérations sur le caractère non exceptionnel de la vie dans l'Univers et sur l'existence probable de formes de vie organique différentes de celles que nous connaissons semblent avoir été tout récemment confirmées expérimentalement par l'analyse de quelques météorites charbonneuses, parmi lesquelles celle qui tomba à Orgueil, près de Montauban, en 1864. Au XIX^e siècle et dans la première moitié du XX^e siècle, la plupart des hommes de science opposèrent un scepticisme stérile à l'intuition de penseurs souvent qualifiés à tort «d'idéalistes», comme le grand Camille Flammarion, selon qui la vie n'est pas l'apanage de notre planète. Cette attitude anthropocentrique de tant de savants «officiels» eut pour conséquence, entre autres, que personne n'eut l'idée de rechercher si les météorites charbonneuses (les plus rares de toutes), ne contenaient pas des cellules fossilisées.

Cellules fossiles extra-terrestres ?

C'est seulement en 1961 que des savants américains, les professeurs Nagy et Claus, publièrent dans la revue anglaise *Nature*, le résultat de l'étude au microscope des fragments de quelques météorites charbonneuses. Cette étude révéla l'existence de cinq variétés différentes cataloguées de cellules fossilisées, chacune ne mesurant que 5 à 30 microns. Leur aspect n'est pas celui des cellules équivalentes terrestres; certaines, de forme hexagonale, qu'on trouve seulement dans la météorite d'Orgueil, présentent des tubulures; d'autres montrent des protubérances superficielles. Elles possèdent une masse centrale rappelant un noyau, et une région claire analogue au cytoplasme, entourée d'une membrane. Quelques-unes paraissent en cours de division par mitose. On compte environ 1 700 cellules par milligramme.

Ces résultats furent immédiatement contestés par de nombreux spécialistes qui, sans avoir pris soin de vérifier par eux-mêmes le

bien-fondé des affirmations de Nagy et Claus, émirent l'hypothèse que, peut-être, les cellules observées étaient d'origine terrestre et avaient contaminé les météorites *après* leur chute. Quelques chercheurs, aux États-Unis, étudièrent cependant la question de façon approfondie. Aucun ne semble avoir mis en doute, à la suite de cette étude, l'origine météoritique (et non terrestre) des formations « cellulaires » observées, mais certains ont cru pouvoir affirmer que ces formations n'étaient que des concrétions cristallines d'origine non vivante. Or Nagy et Claus continuent de maintenir leur propre interprétation et viennent de publier de nouvelles photographies qui paraissent, à première vue, devoir emporter l'adhésion : il s'agirait de cellules et non de concrétions. Des chercheurs néo-zélandais sont arrivés aux mêmes conclusions.

Les choses en sont là pour le moment, mais de nombreux savants sont intéressés par la question et nous ne tarderons sans doute pas à être fixés.

Pluralité des mondes habités

Quoi qu'il en soit, nous savons maintenant que la vie a fait son apparition sur deux planètes au moins du système solaire, et peut-être même sur trois : la Terre, Mars et l'une des planètes fragmentées ayant donné naissance aux météorites. Il devient impossible de prétendre qu'elle n'est pas apparue également ou qu'elle n'apparaîtra pas, sur un nombre énorme de planètes entourant d'autres étoiles. De telles planètes n'ont pas été mises en évidence par l'observation directe, en raison de l'immense éloignement des étoiles. Tout au plus a-t-on décelé, autour de quelques étoiles proches, l'existence de compagnons de faible masse, plus gros cependant que Jupiter (peut-être planétaires, mais plus vraisemblablement stellaires), grâce aux perturbations qu'ils apportent au mouvement de l'étoile centrale. Mais on estime de toute façon à l'heure actuelle que le processus de formation des planètes est tout à fait général autour des étoiles naines à rotation lente comme le Soleil. La vie doit donc être répandue à profusion dans l'Univers.

On peut alors se demander comment il serait possible à l'homme d'entrer en relation avec les formes intelligentes que cette vie n'a pas dû manquer d'élaborer sur de nombreuses planètes extérieures au système solaire. Un projet un peu puéril a été mis sur pied il y a moins de deux ans aux États-Unis dans ce but. C'est le projet OZMA, qui consiste à essayer de recevoir les émissions radio *modulées* émises à notre intention par d'autres formes de vie intelligente habitant les planètes (supposées) des étoiles de type solaire situées dans notre voisinage (quelques dizaines d'années-lumière). La longueur d'onde utilisée pour la réception est celle de 21 cm. Le choix de cette longueur d'onde a été dicté aux auteurs du projet par le fait que c'est une radiation intéressant nécessairement, selon eux, tous les astronomes de l'Univers, puisqu'elle est émise par l'hydrogène neutre de la Galaxie.

Échec du projet Ozma ?

En fait, il faut bien comprendre que les différences d'âge entre systèmes planétaires peuvent être considérables en regard du temps nécessaire à l'apparition d'espèces vivantes nouvelles ; d'autre part, la vitesse d'évolution des espèces n'a aucune raison d'être exactement la même sur chaque planète. De sorte que les quelques systèmes planétaires se trouvant à portée du projet OZMA, ou bien n'ont pas encore donné naissance à une espèce intelligente — et, en ce cas, nous ne pouvons en recevoir de messages — ou bien ont toutes chances de supporter des espèces plus évoluées que l'espèce humaine et possédant, de ce fait, une technologie n'ayant plus guère de points communs avec la nôtre. Il est probable que de tels êtres n'auraient aucune raison d'utiliser, pour nous « parler », la longueur d'onde de 21 cm, et qu'ils possèderaient des moyens autrement efficaces pour nous connaître. Il n'est pas évident, du reste, que ces moyens seraient à la portée de notre intelligence humaine, s'il se trouve que l'évolution biologique de ces êtres les a conduits à un niveau psychique situé très au-dessus de celui de notre espèce, ce que nous ne pouvons pas savoir.

Il est un fait, c'est que le projet OZMA n'a, jusqu'ici, donné aucun résultat. Cela ne nous paraît pas étonnant, et ne saurait être invoqué pour prétendre que nous sommes la seule espèce intelligente dans l'Univers. Tout au plus pourrait-on en déduire — si l'échec du projet OZMA se confirme — que les espèces (supposées) des systèmes planétaires voisins ne se trouvent pas au même stade d'évolution technologique ou psychique que nous.

Pierre GUÉRIN
Chargé de recherches à
l'Institut d'Astrophysique.

LIBRAIRIE
SCIENCE ET VIE
24, Rue Chauchat, Paris 9e - Tél. TAI 72 86

ASTRONOMIE

Cette bibliographie, établie d'après le stock d'ouvrages sélectionnés de notre librairie, ne représente qu'une partie des ouvrages figurant dans notre catalogue général.
(Catalogue général, 8e édition 1962, prix franco NF 4,00)

ASTRONOMIE GÉNÉRALE

ASTRONOMIE. — Rudaux L. et Vaucouleurs G. (de). — Cet ouvrage présente, pour la première fois en un langage accessible à tous, avec les acquisitions consacrées de l'astronomie classique, les découvertes les plus récentes de l'astronomie moderne. Près de 900 grav., dont un grand nombre de photos du ciel prises dans les grands observatoires. — 520 p. 21 × 30, 891 illustr., 12 pl. en couleurs. Nouvelle édit., 1959 ..... NF **78,00**

ASTRONOMIE GÉNÉRALE. Astronomie sphérique. — Danjon A. — Le mouvement diurne. Mouvement apparent du soleil. Déplacements des plans fondamentaux : la précission, la nutation. Un effet optique du mouvement relatif : L'aberration. Le temps et les variations de la rotation de la terre. Effets géométriques des déplacements relatifs parallaxes et mouvements propres. La réfraction astronomique. — **Éléments de mécanique céleste.** — Mouvement des planètes et des comètes. Détermination des orbites. Les perturbations. Mouvement de la lune. Éclipses, occulations, passages. Lune, planètes et satellites, rotation, phases. Orbites des étoiles doubles, visuelles. interpolation, dérivation, intégration d'une fonction définie par une table numérique. — 446 p. 21 × 27, 192 fig., cart., 2e édit., 1959. NF **90,00**

ASTRONOMIE POPULAIRE CAMILLE-FLAMMARION. — La terre, La Lune. Le soleil. Les mondes planétaires. Les comètes, météores et météorites. L'univers sidéral. Les instruments de l'astronomie. — 600 p. 23,5 × 29, tr. nbr. fig. et schémas, 800 héliogravures, 8 planches en couleurs et 2 cartes du ciel en couleurs. Relié plein pellior vert, 1955 ..... NF **70,00**

ENCYCLOPÉDIE DE L'UNIVERS. — De Vries et Ernst B. — Atlas du ciel. 104 p. sur papier couché, 224 photos et dessins, donnant une synthèse de la composition de l'Univers et des moyens dont dispose l'homme pour y pénétrer. **Encyclopédie alphabétique.** 126 p., 119 cartes d'étoiles et de dessins explicatifs. Un grand nombre de sujets y sont traités : rayonnements cosmiques, possibilité de vie dans l'espace, science radioastronomique, etc. — Un volume format 20 × 27, reliure pleine toile, 1960 .... NF **33,00**

ASTRONOMIE FONDAMENTALE ÉLÉMENTAIRE. — Kourganoff V. — Rappels de cosmographie. Formules fondamentales de trigonométrie sphérique. Mouvement apparent du soleil; temps moyen. Parallaxe annuelle; aberration; réfraction astronomique. Gravitation universelle. 106 p. 16,5 × 24,5, 91 fig., 1961 ..... NF **18,00**

MÉCANIQUE CÉLESTE. — Chazy J. — Équations canoniques et variations des constantes. Équations canoniques et généralisations. Applications de calcul des variations. Théorème de Poincaré. Le théorème de Jacobi et le mouvement elliptique. Méthode de la variation des constantes. Application des équations de la théorie des perturbations. — 270 p. 14,5 × 19, 1953 ..... NF **18,00**

ASTRONOMIE GÉNÉRALE. — Picart L. — (Coll. A.C. N° 50). Le ciel étoilé. Astronomie sphérique. Détermination des distances angulaires. Instruments; procédés d'observation. Corrections des observations. Astronomie stellaire. Mouvement du soleil. Temps. Mouvement des planètes. Gravitation. Orbites. La lune. Éclipses; parallaxe du soleil. Origine du monde solaire. Forme et dimensions de la Terre. — 200 p. 11 × 17, 45 fig., 4e édit., 1945 ..... NF **5,70**

AUX FRONTIÈRES DE L'ASTRONOMIE. — Hoyle F. — Traduit de l'anglais par **E. et M. Vincent.** — Les bizarreries de la terre. La terre au travail. La racine pivotante. Quelques applications diverses de la physique. Généralités au sujet de la lune et des planètes. L'origine des planètes. Le mystère de l'atmosphère solaire. Le soleil et son évolution. L'évolution d'étoiles de volume moyen. La mensuration des distances astronomiques. Naines et géantes. Étoiles explosives. Les bras en spirale de notre galaxie. Origine des étoiles dans les bras de notre galaxie. La galaxie en tant qu'aimant. Le monde des galaxies, leur formation. L'expansion de l'univers. Tests expérimentaux en cosmologie. L'origine continue de la matière. — 386 p. 14 × 23, 48 photos, 67 fig. 1962 ..... NF **21,00**

LA NATURE DE L'UNIVERS. — Hoyle F. — Traduit de l'anglais par **Busso R.-H.** et **Papy J.** — La terre et l'espace environnant. Le soleil et les étoiles. L'origine et l'évolution des étoiles. Origine de la terre et des planètes. La place de l'homme dans l'univers en expansion. — 132 p. 12 × 19, 6 pl. photos hors-texte. 1952 ..... NF **6,00**

ORIGINE ET ÉVOLUTION DES MONDES. — Schatzman E. — Situation de la connaissance. Le système solaire. Les étoiles. **Origine et évolution des étoiles et des systèmes :** Structure interne et évolution. L'origine des étoiles et des systèmes d'étoiles. **Les nébuleuses extragalactiques et la cosmologie:** Position du problème. Les données de l'observation. Théories cosmologiques. **L'origine du système solaire:** Introduction. La théorie nébulaire. Les autres théories. Appendices. — 408 p. 14 × 19, 43 fig., 8 photos hors-texte, 37 tableaux, 1957 ..... NF **15,00**

LA STRUCTURE DE L'UNIVERS. — Whitrow G.J. — Traduit de l'anglais par **Vaucouleurs (G. de).** — Les profondeurs de l'Univers. Espace et temps. Relativité. Modèles d'Univers. L'âge de l'Univers. La structure des nébuleuses. La cosmologie et l'A. priori. Bibliographie — 252 p. 13 × 20, 1955 ..... NF **6,50**

LA CONNAISSANCE DE L'UNIVERS. — Charon Jean E. — Indroduction à l'idée de connaissance. Alice au pays de l'Univers. Structure d'ensemble de l'Univers. Structure microscopique de l'Univers. Les théories unitaires de l'Univers. La vie dans l'Univers. Le psychisme dans l'Univers. Évolution de l'Univers. Remarques finales. Lexique. — 192 p., 12 × 18, nombr. figures et photos. 1961 ..... NF **4,90**

LA VIE DANS L'UNIVERS. Oparine A. et Fessenkov V. — Traduit du russe par Tsipine M. — La vie et son apparition. La situation du Soleil dans l'Univers. Traits fondamentaux de la structure et de l'origine du système solaire. Considérations générales relatives à la structure et à l'évolution des atmosphères de la Terre et des planètes. Conditions physiques et possibilités de vie sur la Lune. Les planètes géantes. Nos voisins les plus rapprochés : Mars et Vénus. — 250 p., 13 × 19,5, 48 fig., 1958 ..... NF **3,50**

L'ORIGINE DE LA TERRE ET DES PLANÈTES. — Lévine B. — Traduit du russe par Brun A. et Gordeeva R. — — Structure du système solaire. Évolution de la cosmogonie planétaire. Formation des planètes selon le théorie de O. Schmidt. Comment s'est formé le nuage de poussière et de gaz circum-solaire. La composition des planètes. Astéroïdes, météorites, comètes. Structure interne de la Terre. L'âge de la Terre. 88 p. 12,5 × 19,5, 20 fig., 1958 ... NF **2,00**

LA TERRE S'EN VA. — Jacot L. — Position de la Terre dans l'Univers. L'expansion de l'Univers. Énigmes du système solaire. Mystères de la Terre. Histoire de la Terre. L'âge de la Terre. L'évolution de la planète ou des cataclysmes du passé aux épreuves de l'avenir. Résumé et conclusions Appendices. — 214 p. 14 × 20, 64 illustra. hors-texte, 1958 ..... NF **19,00**

LA POUSSIÈRE COSMIQUE. Les milieux interplanétaire, interstellaire et intergalactique. — Dauviller A. — Le milieu gazeux interplanétaire. Astéroïdes et microsatellites capturés. Les comètes. Météores. Météorites. Le gaz interstellaire. La fumée interstellaire. Le milieu intergalactique. — 210 p. 14 × 22,5, 31 fig., 9 planches hors texte, cartonné, 1961 ..... NF **25,00**

COSMOLOGIE ET CHIMIE. L'origine des éléments chimiques et l'évolution de l'Univers. — Dauvillier A. — Abondance cosmique des éléments. La génèse des éléments. L'évolution des étoiles. L'évolution de l'Univers et les hypothèses cosmographiques. — 218 p. 14 × 19, 43 fig. et photos. 1955 ..... NF **11,00**

ASTRONOMIE STELLAIRE. — Delhaye J. (Coll. A. C. n° 284). — Caractéristiques intrinsèques. Position et mouvements des étoiles. Détermination de distances en astronomie stellaire. Amas stellaires. Structure du système galactique. Étude cinématique du système galactique. Notions de dynamique galactique. Les systèmes stellaires extra-galactiques. — 212 p. 11 × 16,5, 49 fig., 1953 ..... NF **5,70**

L'ASTRONOMIE NOUVELLE. — Rousseau P. — Valeur humaine de l'Astronomie. Cette obsucre clarté. L'observatoire d'aujourd'hui. La matière stellaire. Témoignage du nuage cosmique. Le nouveau ciel des radiotélescopes. L'architecture des galaxies. Aux frontières de l'espace. — 367 p. 11,5 × 18, 51 fig., nouv. édit. 1958 ..... NF **9,50**

LES GRANDS PROBLÈMES DE L'ASTRONOMIE. — Gauzit J. — Les applications de l'analyse spectrale à l'astronomie. Les dimensions de l'Univers. Les phénomènes solaires. La variété des étoiles. L'énergie atomique, source de la lumière et de la vie. Qu'y a-t-il entre les étoiles ? La Voie Lactée et la Galaxie. Les nébuleuses extragalactiques et l'expansion de l'Univers. L'âge de l'Univers. — 184 p. 14 × 22, 15 fig., 16 pl. hors-texte, 2e édit., 1957 ..... NF **7,80**

POUR COMPRENDRE L'ASTRONOMIE. — Abbé Th. Moreux. — Notre observatoire terrestre. Première étude de la Terre. La gravitation universelle. Le Soleil et les planètes. La Terre. La Lune. Les planètes supérieures. Les Étoiles, Les amas, les nébuleuses, la Voie Lactée. 222 p. 11 × 18, 95 fig. 1958 ..... NF **4,95**

POUR S'INITIER A LA MÉCANIQUE CÉLESTE. — Abbé Th. Moreux. — Comment fut fondée la mécanique céleste. La gravitation universelle. Diamètres apparents, distances et parallaxes. Les lois de Képler. Les masses. Les vitesses. Les perturbations. — 174 p. 11 × 18, 44 fig., 1949 ..... NF **4,95**

L'ASTRONOMIE RÉCRÉATIVE. — Pérelman I. — Traduit du russe. — La terre, sa forme et ses mouvements. La Lune et ses mouvements. Les planètes. Les étoiles. Gravitation. — 212 p. 16 × 21,5, 98 fig., cartonné, 1958 NF **4,50**

NOTES PRATIQUES POUR LES OBSERVATEURS DÉBUTANTS. — Texereau J. — Les instruments. Leur usage. Premiers exercices. Explications des données et notations de la « Revue des constellations ». L'observation du Ciel à l'œil nu et à la jumelle. — 64 p. 16 × 24, 27 fig., 2e édit., 1959 ..... NF **3,50**

LA CONSTRUCTION DU TÉLESCOPE D'AMATEUR — Texereau J. — Considérations générales et projet. Réalisation du grand miroir. Le miroir plan diagonal. Partie mécanique du télescope Newton standard. La monture azimutale du télescope standard. Projet d'un télescope Cassegrain. Réalisation du grand miroir Cassegrain. Le miroir secondaire Cassegrain. Partie mécanique des Cassegrains. Lames de fermeture. Les oculaires. Les montures équatoriales. Accessoires, finition. Réglages. La turbulence atmosphérique. — 296 p. 16 × 24, 150 fig. et 4 pl. hors texte, relié toile, 2e édition revue et augmentée, 1961 ..... NF **24,00**

ASTROPHYSIQUE - RADIOASTRONOMIE

ASTROPHYSIQUE GÉNÉRALE (Pecker J. C. et Schatzman). — Rappel de notions physiques de base : Les fondements de la statistique. Questions de mécanique et l'hydrodynamique. Notions de spectroscopie. Problèmes d'interaction entre matière et rayonnement. **Instruments, méthodes d'observation :** Les limitations de l'observation astronomique. Photométrie. Analyse spectrale, spectrophotométrie. La formation de l'image objective. La construction des combinaisons objectives. L'observation de l'image objective. Accessoires, monture et mouvements des instruments astronomiques. Quelques instruments importants de l'astronomie moderne. **Propriétés intrinsèques des étoiles :** La classification empirique des spectres stellaires. L'interprétation des spectres stellaires par la théorie des atmosphères. La mesure des distances stellaires et des éclats absolus. Étoiles doubles, masses rayons. étoiles variables, novae, spectres particuliers. Structure interne des étoiles. **Les systèmes d'étoiles :** Structure de la galaxie. Cinématique stellaire. Dynamique stellaire. Problèmes d'évolution, La matière inter stellaire. Les nébuleuses extragalactiques. **Soleil et système solaire :** Le soleil, étoile G2 V typique. L'activité solaire, les centres actifs et les phénomènes terrestres. Les planètes. — 756 p. 15 × 24, 5 396 fig., nbr. tabl., cartonné toile, 1959 ..... NF **140,00**

INTRODUCTION A L'ASTROPHYSIQUE. LES ÉTOILES. (Coll. A. C. N° 352). — Dufay J. — Définitions et conditions particulières à la photométrie astronomique. Photométrie et colorimétrie stellaires. Les spectrographes astronomiques. Description et première classification des spectres stellaires. Spectres et magnitudes absolues. Spectres continus des étoiles, gradients et température de couleur. Classifications spectrophotométriques des étoiles. Diamètres et températures effectives des étoiles. Masses et densité des étoiles. Notions élémentaires sur la constitution des atmosphères stellaires. — 218 p. 11 × 17, 51 fig., 11 tabl., 1961 ..... NF **5,70**

POUR COMPRENDRE L'ASTROPHYSIQUE. — Rousseau P. — L'éclat des étoiles. La couleur des étoiles. Une étoile : le Soleil. Spectres célestes. La chaleur des astres. Les révélations des raies spectrales. L'intérieur des étoiles. L'Astrophysique de demain. — 192 p. 11 × 18, 58 fig., 1949 ..... NF **4,95**

RADIOASTRONOMIE. Les méthodes radio-électriques au service de l'Astrophysique. — Steinberg J.-L. et Lequeux J. — Le rôle de l'atmosphère. Le rayonnement thermique. Les radiotélescopes simples. Interféromètres et antennes synthétiques. Les observations spectrales. Les mécanismes d'émission des ondes radioélectriques. L'émission radioélectrique du soleil. Les émissions radioélectriques dans le système solaire. Le rayonnement radioélectrique de la Galaxie. Les radiosources galactiques. Les radiosources extragalactiques. — 296 p. 14 × 22, 155 fig., 1960. NF **19,00**

LA RADIOASTRONOMIE ET SON APPORT NOUVEAU A LA CONNAISSANCE DE L'UNIVERS. — Boischot A. — Les mécanismes d'émission : Les émissions d'origine thermique. Les émission non thermiques. Propagation des ondes radio dans les radiosources et l'atmosphère terrestre. **Les ondes radio-électriques dans l'univers.** Les émissions radio-électriques du soleil. Les émissions de la lune et des planètes. La découverte de la galaxie. Les sources localisées d'émission radio-électrique ou radio-sources. — 126 p. 14,5 × 23, 53 fig., 12 pl. 1960. ..... NF **13,00**

RADIOASTRONOMIE (Chklovski I.). — Traduit du russe par Sézéman A. — Introduction. Éléments de la technique et de la méthode des observations radioastronomiques. Le rayonnement radio-électrique : du Soleil calme, du Soleil en état d'activité, de la Lune. Quelques données sur la structure de la Galaxie. Le rayonnement radioélectrique de la Galaxie. Le rayonnement de la raie radioélectrique de l'hydrogène de 21 centimètres de longueur d'onde. La découverte des « radio-étoiles » Les rayons cosmiques et la seconde composante du rayonnement radioélectrique de la Galaxie. Les radionébuleuses. Les radiogalaxies et le problème du rayonnement radioélectrique de la Métagalaxie. Radarstronomie. Conclusion. — 238 p. 13 × 19,5. 126 fig., Relié toile, sous jaquette couleurs 1958 ..... NF **6,00**

ÉTOILES - PLANÈTES - SOLEIL

ATLAS DU CIEL. — Callatay (V. de). — Cet ouvrage se compose de : 36 grandes planches à fond noir, couvrant ensemble la totalité de l'Univers ; 45 cartes complémentaires représentant, dans leurs délimitations, les 88 constellations ; des textes commentant les caractéristiques de chaque région celeste ; une trentaine de théories élémentaires sur les principales questions intéressant l'astronomie ; des tableaux synoptiques facilitant la recherche des constellations parmi les différentes planches et cartes ; la reproduction d'une douzaine de photographies prises au téléscope. — 157 p. 24 × 32, cartonné, sous jaquette illustrée en 2 couleurs. Nouveau tirage, 1959 ..... NF **45,00**

ATLAS CÉLESTE. — Moreux (Abbé). — Aspects du ciel visible dans nos régions pour chaque mois de l'année. — 12 cartes du ciel avec explications, album 25 × 32. NF **4,95**

IMAGES DU CIEL. — Gauzit J. — Les grandes étapes de l'Astronomie. Nos voisines les planètes. Le Soleil et les étoiles. La galaxie et les nébuleuses extra-galactiques. — 66 p. 21 × 27, 89 planches photos, 1960 ..... NF **18,50**

ATLAS DE LA LUNE. — Callataÿ (V. de) : Éléments d'astronomie. Mouvements et nature de la Lune. — Le satellite et ses lois fondamentales. Révolution de la Lune autour de la Terre. Les phases de la Lune. Distance, superficie et masse de la Lune. Rotation de la Lune sur elle-même. Trajectoire apparente de la Lune. Mécanisme des éclipses. Éclipses de Lune. Éclipses de Soleil. Les marées. Description du relief lunaire. Structure du sol lunaire. Origine des formations lunaires. L'atmosphère lunaire. Les deux faces de la Lune. La forme du sélénoïde. — **Atlas :** Atlas photographique comportant 22 doubles pages illustrées de 86 photographies : cartes en pleine page, cartes de localisation, cartes de dénomination des formations lunaires et cartes de détails des formations remarquables. Description de ces formations. Carte provisoire de l'autre face de la Lune. Index alphabétique général des formations avec référence aux cartes et origine des dénominations. — **Astronautique :** Trajectoires extra-terrestres. Les fusées. La vie à bord d'une fusée. Les étapes du voyage. 160 p. 23,5 × 32. 66 fig. et croquis. 146 photos. Relié toile. 1962 ..... NF **60,00**

NÉBULEUSES GALACTIQUES ET MATIÈRE INTERSTELLAIRE. — Dufay J. — Atomes et molécules dans l'espace. Grains solides dans l'espace. Des atomes aux grains et des grains aux étoiles. La matière diffuse hors de la voie lactée. — 492 p. 14 × 19, 51 fig., 1954 ..... NF **16,50**

A LA CONQUÊTE DES ÉTOILES. — Rousseau P. — L'homme primitif entre les dieux et les astres. Le génie grec entrevoit le soleil au centre du monde. A l'école de la science barbare. Les quatre grands de la conquête céleste. Les navigateurs réclament l'inventaire du ciel. Laplace et Herschel : l'explication et l'image du monde. Un pas vers les étoiles. Le soleil, une étoile de la voie lactée. L'univers où nous roulons. — 352 p. 15 × 21, 12 fig., 1956 ..... NF **8,75**

LE MONDE DES ÉTOILES. — Rousseau P. — Notre système solaire. Notre étoile : le Soleil. Le peuple des étoiles. Notre cité d'étoiles : la Galaxie. Univers-îles dans l'Océan du ciel. — 247 p. 12 × 19, 50 fig , pl. nouv., édit. 1956. NF **5,00**

LES PLANÈTES. — Bruhat G. et Schatzman. — Généralités. La terre. La lune. La surface des planètes. Structures interne des planètes. Étude particulière des planètes et de leurs satellites. Petites planètes, comètes, météores, météorites, lumière zodiacale. Les théories cosmographiques. — 300 p. 14,5 × 19, 43 fig., 8 pl. photos 1952 NF **12,00**

L'ORIGINE DES PLANÈTES. Essai de cosmogonie. — Dauvillier A. — Caractères du système solaire. L'accrétion. La théorie de Laplace. Théories diverses. Les marées. Les collisions. Le problème cosmogonique. La théorie des planètes jumelles. La nature des planètes. Les systèmes stellaires multiples. — 224 p. 14 × 19, 49 fig., 1956 NF **10,00**

NAISSANCE ET MORT DU SOLEIL (Gamow G.). — Le soleil et son énergie. Anatomie des atomes. Transmutation des éléments. Domestication de l'énergie atomique. Alchimie du soleil. Le soleil parmi les étoiles. Classes d'étoiles « anormales » : géantes rouges, naines, blanches, étoiles pulsantes. Les naines blanches et l'agonie du soleil. Formation des étoiles et des planètes. Chronologie. 162 p. 16 × 21, 68 fig., 1960 ..... NF **7,40**

LE SOLEIL. — Bruhat G. — Données géométriques et physiques sur le soleil. Le rayonnement et la température du soleil. L'étude de la surface solaire. Le spectre solaire. Niveau des vapeurs et mouvements généraux dans la chromosphère. Les images monochromatiques de la chromosphère. Résultats généraux des observations spectrohéliographiques. La couronne. Les théories sur le soleil. Phénomènes terrestres en relation avec l'activité solaire. — 222 p. 14,5 × 19,5, 43 fig., 16 pl. photos hors texte, 1951. nlle édit. rev. et mise à jour p. d'Azambuja L. ..... NF **12,00**

NOTRE SOLEIL. — Rousseau P. — Destin du soleil, destin des hommes. Anatomie du soleil. Histoire d'un rayon de soleil. Du point de vue de Sirius. Avenir du soleil. — 254 p. 13 × 20, 48 fig., 9 pl. hors texte, 1953 ..... NF **6,50**

L'EXPLORATION DES GALAXIES VOISINES par les méthodes optiques et radio-électriques. — G. de Vaucouleurs. — Introduction et généralités. Morphologie et classification. Indicateurs de distances. Luminosités et dimensions. Spectres, couleurs et polarisation. Rayonnement radioélectrique. Rotation et masses. 156 p. 14 × 22,5, 47 fig. ,6 tabl. et 18 pl. hors texte, 1958 ..... NF **17,50**

LES RAYONS COSMIQUES dans leurs rapports avec l'Électricité atmosphérique, la Météorologie, le Géomagnétisme et l'Astronomie. — Dauvillier A. —

Tome I : Historique. Les rayons cosmiques et l'électricité atmosphérique. Méthodes de mesures des rayons cosmiques. Absorption dans la matière. — 248 p. 16 × 25, 116 fig., 1954 ..... NF **22,00**

Tome II : Géomagnétisme et rayons cosmiques. Nature des rayons cosmiques. Bilan énergétique. Génétique. Effets provoqués par les rayons cosmiques. Des variations. Météorologie et rayons cosmiques. Origine des rayons cosmiques. — 318 p. 16 × 25, 137 fig., 1954 ..... NF **32,00**

Les commandes doivent être adressées à la LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, Paris (9e). Elles doivent être accompagnées de leur montant, soit sous forme de mandat-poste (mandat-carte ou mandat-lettre), soit sous forme de virement ou de versement au Compte Chèque Postal de la Librairie : Paris 4192-26. Au montant de la commande doivent être ajoutés les frais d'expédition, soit 10 % (avec un minimum de NF 1,00). Envoi recommandé : NF 0,70 de supplément.

Il n'est fait aucun envoi contre remboursement.

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, PARIS (9e)

Le directeur de la publicat.: Jacques DUPUY — Dép. légal: 1962, N° 2.023 — Imp. des Dernières Nouvelles de Strasbourg

N'ATTENDEZ PAS!

Commencez chez vous dès maintenant

les études les plus profitables

grâce à l'**enseignement par correspondance de l'Ecole Universelle,** la plus importante du monde, qui vous permet de faire chez vous, en toutes résidences, à tout âge, aux moindres frais, des études complètes dans toutes les branches, de vaincre avec une aisance surprenante les difficultés qui vous ont jusqu'à présent arrêté, de conquérir en un temps record le diplôme ou la situation dont vous rêvez. L'enseignement étant individuel, vous avez intérêt à commencer vos études dès maintenant.

Demandez l'envoi gratuit de la brochure qui vous intéresse :

Br. 72.800 : **Les premières classes : 1er degré, 1er cycle :** Cours préparatoire (Cl. de 11e), Cours élémentaire (Cl. de 10e et 9e), Cours moyen (Cl. de 8e et 7e), Admission en 6e.

Br. 72.805 : **Toutes les classes, tous les examens : 1er degré, 2e cycle :** Cl. de fin d'études, Collèges d'Enseignement général, C.E.P., Brevets, C.A.P.; **2e degré :** de la 6e aux Cl. de Lettres sup. et de Math. spéc., Baccalauréats, B.E.P.C., E.N., Bourses; **Classes des Lycées techniques,** Brevets d'enseign. industr. et commerc., Bacc. technique.

Br. 72.802 : **Les études de Droit :** Capacité, Licence, Carrières juridiques (Magistrature, Barreau, etc.).

Br. 72.814 : **Les études supérieures de Sciences :** P.C.B., M.G.P., M.P.C., S.P.C.N., etc. Certificats d'études sup., C.A.P.E.S. et Agrégation de Math.

Br. 72.823 : **Les études supérieures de Lettres :** Propédeutique, certif. d'ét. sup., C.A.P.E.S., Agrégation.

Br. 72.827 : **Grandes Ecoles et Ecoles spéciales :** Polytechnique, Écoles normales sup., Chartes, Écoles d'Ingénieurs, **Militaires** (Terre, Air, Mer), d'**Agriculture** (France et Républiques Africaines), de **Commerce, Beaux-Arts, Administration, Lycées techn. d'État, Écoles spéciales d'Assistantes sociales,** Infirmières, Sages-Femmes.

Br. 72.804 : **Carrières de l'Agriculture** (Régisseur, Directeur d'Exploitation, Chef de culture, Aviculteur, Apiculteur, Contrôle laitier, conseiller agricole, etc.), des **Industries agricoles** (Laiterie, Sucrerie, Meunerie, etc.), du **Génie rural** (Entrepreneur, Conducteur, Chef de chantier, Radiesthésie), de la **Topographie** (Géomètre expert).

Br. 72.815 : **Carrières de l'Industrie et des Travaux publics :** Électricité, Électronique, Physique nucléaire, Mécanique, Automobile, Aviation, Métallurgie, Mines, Prospection pétrolière, Travaux publics, Architecture, Métré, Béton armé, Chauffage, Froid, Chimie, Dessin industriel, etc.; C.A.P., B.P., Brevets de technicien (Bât., Tr. Publics, Chimie); Préparations aux fonctions d'ouvrier spécialisé, Agent de maîtrise, Contremaître, Dessinateur, Sous-Ingénieur. Admission aux stages payés de formation profess. accélérée (F.P.A.).

Br. 72.803 : **Carrières de la Comptabilité :** Caissier, Chef-magasinier, Teneur de Livres, Comptable, etc.; Prép. au C.A.P. d'Aide-Comptable, au B.P. de Comptable, au Diplôme d'État d'Expert-Comptable.

Br. 72.816 : **Carrières du Commerce :** Employé de bureau, Sténodactylo, Employé de Banque, Publicitaire, Secrétaire, Secrétaire de Direction, etc.; prép. aux C.A.P. et B.P.; **Publicité, Banque, Bourse, Assurances, Hôtellerie.**

Br. 72.807 : **Pour devenir Fonctionnaire** (jeunes gens et jeunes filles, sans diplôme ou diplômés) dans les P. et T., les Finances, les Travaux publics, les Banques, la S.N.C.F., la Police, le Travail et la Sécurité Sociale, les Préfectures, la Magistrature, etc.; **École Nationale d'Administration.**

Br. 72.817 : **Les Emplois Réservés** aux militaires, aux victimes de guerre et aux veuves de guerre : examens de 1re, de 2e et de 3e catégorie; examens d'aptitude technique spéciale.

Br. 72.810 : **Orthographe, Rédaction, Versification, Calcul, Dessin, Écriture.**

Br. 72.819 : **Calcul extra-rapide et calcul mental.**

Br. 72.806 : **Carrières de la Marine Marchande :** Admiss. dans les Écoles Nat. de la Marine March., Élève-Officier au long cours, Élève-chef de quart; Capitaine de la Marine Marchande; Capitaine et Patron de Pêche; Officier Mécanicien de 2e ou de 3e classe de l'École nationale de la Marine marchande; Certificats internationaux de Radio de 1re ou 2e classe (P. et T.).

Br. 72.824 : **Carrières de la Marine de Guerre :** École Navale; École des Élèves-Officiers; École des Élèves-Ingénieurs mécaniciens; École du Service de Santé; Commissariat et Administration; École de Maistrance; Écoles d'Apprentis marins; Écoles de Pupilles; Écoles techniques de la Marine; École d'application du Génie Maritime.

Br. 72.818 : **Carrières de l'Aviation :** Écoles et carrières militaires : Éc. de l'Air, Éc. mil. de sous-off., élèves-off., Personnel navigant, Mécaniciens et Télémécaniciens; Aéronautique civile; Carrières administratives; Industrie aéronautique. — Hôtesses de l'Air.

Br. 72.801 : **Radio :** Construction, dépannage. - **Télévision.**

Br. 72.826 : **Langues vivantes :** Anglais, Espagnol, Allemand, Russe, Italien, Arabe. — Tourisme.

Br. 72.808 : **Études musicales :** Solfège, Harmonie, Composition, Direction d'orchestre; Piano, Violon, Flûte, Clarinette, Accordéon, Guitare, Instruments de Jazz; Chant, Professorats publics et privés.

Br. 72.820 : **Arts du Dessin :** Dessin pratique, Cours universel de Dessin, Anatomie artistique, Illustration, Figurines de mode, Composition décorative, Aquarelle, Gravure, Peinture, Pastel, Fusain; Professorats.

Br. 72.825 : **Carrières de la Couture et de la Mode :** Coupe, Couture (Flou et tailleur), Lingerie, Corset, Broderie; C.A.P., B.P., professorats officiels; Préparations aux fonctions de Petite Main, Seconde Main, Première Main, Vendeuse-Retoucheuse, Modiste, Coupeur hommes, Chemisier, etc. — **Enseignement Ménager :** Monitorat et Professorat.

Br. 72.811 : **Secrétariats** (Secrétaire de direction, Secrétaire particulier, Secrétaire de médecin, d'avocat, d'homme de Lettres, Secrétaire technique); **Journalisme; l'Art d'écrire** (Rédaction littéraire) et **l'Art de parler en public** (Éloquence usuelle).

Br. 72.821 : **Cinéma :** Technique générale, Décoration, Prises de vues, Prise de son. - **Photographie.**

Br. 72.809 : **L'Art de la Coiffure et des Soins de Beauté.**

Br. 72.828 : **Toutes les Carrières féminines.**

Br. 72.812 : **Cultura :** Cours de Perfectionnement culturel, Lettres, Sciences, Arts, Éducation civique, Actualités.

La liste ci-dessus ne comprend qu'une partie de nos enseignements. N'hésitez pas à nous écrire. Nous vous donnerons gratuitement tous les renseignements et conseils qu'il vous plaira de nous demander.

DES MILLIERS D'INÉGALABLES SUCCÈS

remportés chaque année par nos élèves dans les examens et concours officiels prouvent l'efficacité de l'enseignement par correspondance de

L'ÉCOLE UNIVERSELLE, 59, boulevard Exelmans - PARIS-XVIe

14, Chemin de Fabron, NICE (A.-M.) - 11, place Jules-Ferry, LYON

Encres brillantes typo Brancher Frères Imprimé en France Imp. Blanchard - Paris

Elle réussit

toutes ses photos couleurs avec

GEVACOLOR

JEANDOT Ph. VILTER

ROUDEIX 772

NOUVEAUX PRIX EN BAISSE

Les Films 24x36 GEVACOLOR N 5 sont livrés en 12 et 20 poses. Pour les amateurs désireux de faire développer rapidement une petite série de photos, prises au cours d'un week-end, d'une réunion d'amis ou toute autre circonstance GEVAERT conseille le film GEVACOLOR N 5 - 12 poses. Les films et ciné-films GEVACOLOR R 5 présentent les mêmes remarquables qualités que le GEVACOLOR N 5.

1,10 NF Epreuves 6 x 9 cm *seulement* d'après négatifs 24 x 36 mm

1,50 NF Epreuves 9 x 9 cm d'après négatifs 4 x 4 cm ou 6 x 6 cm
Epreuves 9 x 13 cm d'après négatifs 24 x 36 mm - 4 x 6,5 cm - 6 x 9 cm

GEVAERT

QUALITÉ CONSTANTE ▪ LIVRAISON RAPIDE